

AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE *SLURRY-INFILTRATED MAT* CONCRETE DE BAIXO CUSTO COMERCIAL

Gonçalo Fernandes Réfega

**Mestrado em Engenharia Civil
Área de Especialização: Construção
Dissertação**

ORIENTADORES:

Professora Mestre Cristiana Nadir Gonilho Pereira

Professora Doutora Ana Mafalda Saldanha Guedes

Dezembro 2017

Dissertação submetida no Instituto Politécnico de Setúbal

AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE *SLURRY-INFILTRATED MAT CONCRETE* DE BAIXO CUSTO COMERCIAL

Mestrado em Engenharia Civil

DECLARAÇÃO DE AUTORIA DO TRABALHO

Declaro ser o autor deste trabalho, que é original e inédito. Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluída.

Gonçalo Fernandes Réfega

(assinatura)

DIREITOS DE COPIA OU COPYRIGHT

© **Copyright:** Gonçalo Fernandes Réfega

O Instituto Politécnico de Setúbal tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicitar este trabalho através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de o divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Se você quer ser bem sucedido, precisa ter dedicação total, buscar seu último limite e dar o melhor de si mesmo.

Ayrton Senna

AGRADECIMENTOS

Apesar de a presente dissertação ser um trabalho individual, não teria sido possível concretizá-lo sem o apoio e dedicação de todas as pessoas e entidades que, intervieram nesta etapa. Assim, pretendo agradecer a todos os que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desta dissertação.

À Professora Cristiana Pereira, docente e orientadora, por me ter apoiado e motivado desde o início, por me ter encaminhado e partilhado os seus conhecimentos, por todo o tempo disponibilizado em prol do trabalho. Pela dedicação e por me ter aturado mesmo quando as condições não foram as mais favoráveis. Agradeço também a confiança e toda a honestidade que teve para comigo.

À Professora Mafalda Guedes, coorientadora da presente dissertação, pela ajuda na caracterização da lá de aço, pela partilha de conhecimentos e pela disponibilidade, tanto na realização de ensaios laboratoriais como na revisão da dissertação.

Ao Sr. Alexandre Gamito, técnico do laboratório de engenharia civil da ESTBarreiro/IPS, por toda a ajuda e paciência que teve para comigo durante a parte experimental da dissertação. Pela disponibilidade, prontidão e partilha de conhecimentos. Por nunca me ter deixado desamparado e principalmente por me ter feito sentir que a última decisão era minha.

A toda a ESTBarreiro/IPS, pela disponibilização de equipamentos e materiais que permitiram a realização deste trabalho. Pela contribuição para a minha formação e pela transmissão e partilha de conhecimentos de engenharia e de vida, que fizeram de mim um melhor profissional.

E por fim, mas não menos importante, à minha família e amigos, que me apoiaram de forma incondicional em todas as etapas deste percurso que foi longo e cansativo:

Pai, Mãe, obrigado pela total confiança que depositam em mim e por acreditarem nas minhas capacidades e por me darem força. Por compreenderem todas as minhas “ausências” ao longo deste tempo. Por me apoiarem e por confiarem em mim. E ao meu irmão, companheiro de uma vida e, inconscientemente, o meu apoio e incentivo.

À minha namorada, por ter sido o meu pilar durante todo este percurso. Pela força incansável e pela compreensão do tempo “perdido” em prol da realização deste trabalho. Por nunca me ter deixado desamparado e por ter permanecido SEMPRE do meu lado, pelas opiniões e pontos de vista partilhados, pela ajuda na organização, redação e correção de erros e por tudo na vida para além da parte profissional.

Aos meus amigos e colegas pelo apoio e motivação, pela troca de opiniões e por me ouvirem e respeitarem. A todos os meus amigos do cantinho em geral, pelos momentos de descontração que me ajudaram a desanuviar nas alturas mais críticas e desgastantes deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho pretende contribuir para o desenvolvimento dos estudos no âmbito do *Slurry Infiltrated Mat Concrete* (SIMCON).

Esta dissertação diz respeito à produção de *Slurry Infiltrated Mat Concrete* de baixo custo comercial (SIMCON-BCC) já que no SIMCON produzido, a manta/lã de aço utilizada foi de baixo custo comercial, vulgo palha-de-aço, à qual se fez infiltrar uma calda de cimento de alta resistência.

O SIMCON-BCC foi produzido com um Cimento Portland tipo I 52,5R, uma razão água/cimento de 0.3, um adjuvante superplastificante Powerflow 2230 (MC-Bauchemie) na dosagem de 1% da massa de cimento e uma lã de aço (palha de aço nº3, Drogomóvel) na dosagem de 10% da massa de cimento.

O estudo debruçou-se sobre a durabilidade do material quando sujeito a condições de cura e/ou ambientes potencialmente agressivos, a saber:

- Betão simples, sem reforço, por forma a avaliar o desempenho da matriz cimentícia;
- SIMCON-BCC sujeito a condições de cura padrão;
- SIMCON-BCC sujeito a cura efetuada em condições ambientais correntes;
- SIMCON-BCC sujeito a cura efetuada em ambiente marítimo submerso;
- SIMCON-BCC sujeito a cura padrão e posterior exposição a ciclos de gelo/degelo;
- SIMCON-BCC sujeito a cura padrão e posterior exposição a altas temperaturas.

A durabilidade do material foi avaliada através da realização de ensaios de caracterização no estado endurecido relativos às propriedades físicas e mecânicas, designadamente massas volúmicas e porosidades, absorção de água por capilaridade, velocidade de propagação de ultrassons (módulo de elasticidade dinâmico), resistência à tração por flexão e resistência à compressão.

Os resultados obtidos permitiram concluir que o SIMCON-BCC foi muito afetado pelas condições de cura. Nomeadamente, a matriz foi particularmente afetada quando a cura ocorre em condições ambientais correntes, enquanto o ambiente marítimo submerso afeta principalmente o reforço.

Os ciclos gelo/degelo aplicados, aliados ao baixo grau de saturação do SIMCON-BCC e características da matriz, não afetaram de forma significativa o desempenho do material. A exposição a temperaturas de 800°C foi bastante agressiva para o SIMCON-BCC tendo as resistências mecânicas diminuído drasticamente e as porosidades aumentado de forma acentuada.

PALAVRAS-CHAVE: betão, lã de aço, SIMCON, ambientes agressivos, durabilidade.

ABSTRACT

This dissertation engage the production of Slurry Infiltrated Mat Concrete of low commercial cost (SIMCON-BCC) since in the SIMCON produced, the mat/steel wool used was of low commercial cost, to which it was made infiltrate a high-strength cement slurry.

The SIMCON-BCC was produced with a Portland cement type I 52.5R, a water/cement ratio of 0.3, a superplasticizer adjuvant Powerflow 2230 (MC-Bauchemie) in the dosage of 1% of the cement mass and a steel wool of steel nº3, Drogomóvel) in the dosage of 10% of the mass of cement.

The study focused on the durability of the material when subjected to curing conditions and/or potentially aggressive environments, namely:

- Simple concrete, without reinforcement, in order to evaluate the performance of the cement matrix;
- SIMCON-BCC subject to standard curing conditions;
- SIMCON-BCC subject to curing performed under current environmental conditions;
- SIMCON-BCC subject to healing performed in submerged in maritime environmental;
- SIMCON-BCC subject to standard curing and subsequent exposure to freeze/thaw cycles;
- SIMCON-BCC subject to standard curing and subsequent exposure to high temperatures.

The durability of the material was evaluated by performing characterization tests in the hardened state related to the physical and mechanical properties, namely density and pores, water absorption by capillarity, ultrasonic propagation velocity (dynamic modulus of elasticity), tensile strength by bending and compressive strength.

The results allowed to conclude that the SIMCON-BCC was very affected by the conditions of cure. Notably, the matrix was particularly affected when curing occurs under current ambient conditions, while the submerged maritime environment mainly affects reinforcement.

The freeze/thaw cycles applied with the low degree of saturation of the SIMCON-BCC and matrix characteristics, did not affect significantly the performance of the material. Exposure to temperatures of 800°C was quite aggressive for SIMCON-BCC, with the mechanical resistances decreased dramatically and pores increased markedly.

KEYWORDS: concrete, steel wool, SIMCON, aggressive environments, durability.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
 1. INTRODUÇÃO	 1
1.1. ENQUADRAMENTO.....	1
1.2. OBJETIVO E MOTIVAÇÃO	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3
 2. BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS	 5
2.1. BETÃO	5
2.2. BRF (BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS)	8
2.3. SIFCON (SLURRY INFILTRATED FIBRE CONCRETE)	11
2.4. SIMCON (SLURRY INFILTRATED MAT CONCRETE).....	14
2.5. SIMCON-BCC (SLURRY INFILTRATED MAT CONCRETE DE BAIXO CUSTO COMERCIAL).....	16
 3. AMBIENTES AGRESSIVOS	 19
3.1. CURA EM CONDIÇÕES AMBIENTAIS CORRENTES	19
3.2. CURA EM AMBIENTE MARÍTIMO SUBMERSO	21
3.3. EXPOSIÇÃO A CICLOS DE GELO/DEGELO	23
3.4. EXPOSIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS	25
 4. CAMPANHA EXPERIMENTAL	 29
4.1. MATERIAIS/PRODUÇÃO	29
4.1.1. CIMENTO.....	29
4.1.2. ADJUVANTE.....	29
4.1.3. LÃ DE AÇO	31

4.1.4. COMPOSIÇÃO E PRODUÇÃO	33
4.2. PLANO DE ENSAIOS	36
4.3. CARACTERIZAÇÃO DO SIMCON-BCC NO ESTADO FRESCO	37
4.3.1. DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO.....	37
4.3.2. DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA NO ESTADO FRESCO	39
4.4. CARACTERIZAÇÃO DO SIMCON-BCC NO ESTADO ENDURECIDO	40
4.4.1. MASSA VOLÚMICA APARENTE	40
4.4.2. DETERMINAÇÃO DAS MASSAS VOLÚMICAS E POROSIDADES	40
4.4.3. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	45
4.4.4. RESISTÊNCIA À FLEXÃO	48
4.4.5. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	49
4.4.6. DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASSONS E MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO	49
4.5. CONDIÇÕES DE ESTUDO	51
4.5.1. CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA	51
4.5.2. CONDIÇÕES AMBIENTAIS CORRENTES	52
4.5.3. AMBIENTE MARÍTIMO SUBMERSO.....	54
4.5.4. GELO/DEGELO	55
4.5.5. ALTAS TEMPERATURAS	56
5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	59
5.1. RESULTADOS REFERENTES À CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO	61
5.1.1. DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO.....	61
5.1.2. DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA APARENTE NO ESTADO FRESCO.....	63
5.2. RESULTADOS REFERENTES À CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO	64
5.2.1. MASSA VOLÚMICA APARENTE	65
5.2.2. DETERMINAÇÃO DAS MASSAS VOLÚMICAS E POROSIDADES	66
5.2.3. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	74
5.2.4. RESISTÊNCIA À FLEXÃO	76
5.2.5. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	78
5.2.6. DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASSONS E MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO	79
5.3. DISCUSSÃO DE RESULTADOS	82
5.3.1. INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DE LÃ DE AÇO	82

5.3.2. CURA EM CONDIÇÕES AMBIENTAIS CORRENTES	87
5.3.3. CURA EM AMBIENTE MARÍTIMO SUBMERSO.....	91
5.3.4. EXPOSIÇÃO A CICLOS DE GELO/DEGELO	95
5.3.5. EXPOSIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS	98
 6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	103
6.1. INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DE LÃ DE AÇO	103
6.2. CURA EM CONDIÇÕES AMBIENTAIS CORRENTES	103
6.3. CURA EM AMBIENTE MARÍTIMO SUBMERSO.....	104
6.4. EXPOSIÇÃO A CICLOS DE GELO/DEGELO	104
6.5. EXPOSIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS	105
6.6. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	105
 7. BIBLIOGRAFIA.....	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas de produção do cimento [VCIMENTOS, 2009]	5
Figura 2 - Imagem esquemática da superfície de clínquer obtida por microscópio ótico (x100) [Adaptado de GOMES 2013].....	7
Figura 3 - Largura média de abertura de fissuras a variar com volume de fibras [ACI544.1R-96]	10
Figura 4 - Exemplos de fibras de aço deformada [Adaptado de BRANDT, 2008].....	10
Figura 5 – Influência do tamanho das fibras no controlo de tensão e deformação [Adaptado de BRANDT, 2008].....	11
Figura 6 - O processo para tornar o elemento do tipo SIFCON [INZYNIERBUDOWNICTWA, 2009]	12
Figura 7 - Curvas típicas da tensão/extensão do BRF e do SIFCON [Naaman 1987].....	12
Figura 8 - Comparação das curvas de tensão-extensão do SIFCON, do BRF com 2% de fibras de aço e de betão convencional sem reforço, carregada em 3 pontos de flexão [COSKUN, 2002]	13
Figura 9 – Exemplo de manta de fibras SIMCON [COSKUN, 2002]	15
Figura 10 - Comparação do comportamento à flexão de SIFCON e SIMCON [COSKUN, 2002]	15
Figura 11 – Aparência interior do SIMCON [ARMITA]	17
Figura 12- Relação entre humidade relativa do ar e expansão/retração do betão [COUTINHO, 1994]	20
Figura 13 - Proporção entre os principais elementos constituintes de uma típica amostra de água do mar com salinidade de 35g/l [Adaptado de LIMA & MORELLI, 2004].....	21
Figura 14 - Apresentação das distintas regiões (zonas) de agressividade às estruturas de betão [Adaptado de LIMA & MORELLI, 2004].....	22
Figura 15 - Seção transversal esquemática de um corpo de prova de betão submetido ao arrefecimento [Adaptado de LIMA e LIBORIO, 2009]	24

Figura 16 - Micrografias eletrónicas de varrimento obtidas em temperaturas criogénicas: (a) Poro preenchido parcialmente por cristais de gelo; (b) Poro após a sublimação dos cristais de gelo [LIMA e LIBORIO, 2009].....	25
Figura 17 – Porção de lâ de aço	31
Figura 18 – Imagens das secções da lâ de aço através de microscópio eletrónico ótico [MlcroLab, IST].....	32
Figura 19 - Imagens da lâ de aço através de Microscópio eletrónico ótico [MlcroLab, IST] .	32
Figura 20 - Gráfico EDS (representativo dos constituintes químicos da lâ de aço) [MlcroLab, IST].....	33
Figura 21 – Colocação da lâ de aço nos moldes	35
Figura 22 - Esquema do preenchimento dos moldes	35
Figura 23 - Utilização racionalizada dos provetes, relativamente aos ensaios realizados no estado endurecido	37
Figura 24 - Molde troncocónico [Laboratório de Engenharia Civil, ESTBarreiro/IPS].....	38
Figura 25 - Pasta cimentícia após remoção do molde e em fase de espalhamento [Laboratório de Engenharia Civil, ESTBarreiro/IPS]	38
Figura 26 - Pesagem da mistura no estado fresco [Laboratório de Engenharia Civil, ESTBarreiro/IPS].....	39
Figura 27 - Configuração e dimensão dos provetes	40
Figura 28 - Pesagem de provetes [Laboratório de Engenharia Civil, ESTBarreiro/IPS].....	41
Figura 29 - Recipiente equipado com medidor de pressão [Laboratório de Engenharia Civil, ESTBarreiro/IPS].....	42
Figura 30 - Esquema descritivo do equipamento de ensaio de porosidade aberta [Adaptado de DIAS, 2015].....	42
Figura 31 - Esquema do recipiente utilizado para o ensaio de absorção de água por capilaridade.....	46
Figura 32 - Pesagem de provetes [Laboratório de Engenharia Civil, ESTBarreiro/IPS].....	46
Figura 33 – Ensaio de absorção por capilaridade.....	47
Figura 34 - Dispositivo de aplicação da carga nos provetes (carga a meio vão) [IPQ, 2009]; [Laboratório de Engenharia Civil, ESTBarreiro/IPS]	48

Figura 35 - Dispositivo de aplicação da carga nos provetes [IPQ, 2009]; [Laboratório de Engenharia Civil, ESTBarreiro/IPS]	49
Figura 36 - Equipamento de ensaio do módulo de elasticidade dinâmico [Laboratório de Engenharia Civil, ESTBarreiro/IPS]	50
Figura 37 - Processo de cura padronizada dos provetes [Laboratório de Engenharia Civil, ESTBarreiro/IPS]	51
Figura 38 - Ensaio de exposição a condições ambientais correntes [ESTBarreiro/IPS]	52
Figura 39 - Temperatura durante o ensaio de condições ambientais correntes	53
Figura 40 - Humidade Relativa durante o ensaio de condições ambientais correntes	53
Figura 41 - Comparação da temperatura com a humidade relativa durante o ensaio de condições ambientais correntes	54
Figura 42 - Acondicionamento dos provetes submersos em água do mar [Laboratório de Engenharia Civil, ESTBarreiro/IPS]	54
Figura 43 - Ensaio de ciclos gelo/degelo [Laboratório de Engenharia Civil, ESTBarreiro/IPS]	55
Figura 44 - Ciclo gelo/degelo [Adaptado de SETZER, 1996]	56
Figura 45 – Disposição dos provetes no interior da mufla [Laboratório de investigação da secção de Engenharia Química e Biológica, ESTBarreiro/IPS]	57
Figura 46 - Taxa de aquecimento da mufla [Laboratório de investigação da secção de Engenharia Química e Biológica, ESTBarreiro/IPS]	57
Figura 47 - Equipamento utilizado para determinar temperatura superficial dos provetes [Laboratório de Engenharia Civil, ESTBarreiro/IPS]	58
Figura 48 - Espalhamento da pasta cimentícia das amassaduras efetuadas	62
Figura 49 - Massa volúmica no estado fresco das amassaduras efetuadas	64
Figura 50 - Condições de cura referentes a cada ambiente estudado	65
Figura 51 - Massa volúmica aparente dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes	66
Figura 52 - Volume de poros abertos dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes	67
Figura 53 - Volume aparente dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes	68

Figura 54 - Massa volúmica aparente dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes.....	69
Figura 55 - Massa volúmica real dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes.....	70
Figura 56 - Porosidade aberta dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes.....	71
Figura 57 - Porosidade total dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes	72
Figura 58 - Absorção de água dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes.....	74
Figura 59 - Curvas de absorção de água por capilaridade dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (tempo total do ensaio)	75
Figura 60 - Curvas de absorção de água por capilaridade dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (1ª hora de ensaio).....	76
Figura 61 - Resistência à tração por flexão dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes.....	77
Figura 62 - Resistência à compressão dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes.....	79
Figura 63 - Velocidade de propagação de ultrassons dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes.....	80
Figura 64 - Módulo de elasticidade dinâmico dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes.....	81
Figura 65 - Comparação da massa volúmica aparente com a massa volúmica real e a resistência à tração por flexão, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes.....	83
Figura 66 - Comparação da massa volúmica aparente com a porosidade total e o espalhamento, para as misturas/provetes produzidos	84
Figura 67 - Comparação do coeficiente de capilaridade com a porosidade total e a resistência à compressão, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes.....	85
Figura 68 - Comparação da resistência à compressão com o módulo de elasticidade dinâmico, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes	86
Figura 69 - Comparação da massa volúmica aparente com a velocidade de propagação de ultrassons e o módulo de elasticidade dinâmico, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes.....	87

Figura 70 - Comparação do espalhamento com a massa volúmica aparente no estado fresco e a massa volúmica real, para amassaduras/provetes produzidos	88
Figura 71 - Comparação da massa volúmica real com a massa volúmica aparente e a porosidade total, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes	89
Figura 72 - Comparação da porosidade total com o coeficiente de capilaridade, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes	89
Figura 73 - Comparação da porosidade total com a resistência à flexão e a resistência à compressão, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes	90
Figura 74 - Comparação da porosidade total com a velocidade de propagação de ultrassons e o módulo de elasticidade dinâmico, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes	91
Figura 75 - Comparação da massa volúmica aparente com a porosidade total, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes	92
Figura 76 - Comparação do coeficiente de capilaridade com a porosidade total, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes	93
Figura 77 - Comparação da resistência à compressão com o módulo de elasticidade dinâmico e o coeficiente de capilaridade, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes	93
Figura 78 - Comparação da resistência à flexão com o módulo de elasticidade dinâmico e a massa volúmica real, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes ..	94
Figura 79 - Comparação da massa volúmica aparente com a porosidade total e o módulo de elasticidade dinâmico, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes ..	95
Figura 80 - Comparação da resistência à compressão com a porosidade total e o coeficiente de capilaridade, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes	96
Figura 81 - Comparação da resistência à compressão com a resistência à flexão, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes	97
Figura 82 - Comparação do módulo de elasticidade dinâmico com a velocidade de propagação de ultrassons e a resistência à compressão, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes	98
Figura 83 - Comparação da massa volúmica aparente com a porosidade total e a resistência à compressão, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes	99
Figura 84 - Comparação da porosidade total com a resistência à flexão e o coeficiente de capilaridade, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes	99
Figura 85 - Comparação da massa volúmica real com a resistência à flexão, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes	100

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Principais componentes do clínquer [GOMES]	6
Tabela 2 - Percentagem de resistências residuais de betão de cimento Portland normal relativamente à resistência aos 28 dias quando sujeito a várias temperaturas [COSTA, 2012]	26
Tabela 3 - Dados técnicos do superplastificante PowerFlow 2230 [MC-BAUCHEMIE, 2009]	30
Tabela 4 - Dosagem de constituintes para produção de 1 m ³ de calda de cimento.....	34
Tabela 5 - Procedimento de amassadura.....	34
Tabela 6 - Resumo dos procedimentos realizados e respetivas normas utilizadas	36
Tabela 7 - Impacto dos resultados individuais em relação à média, para resultados da ordem de grandeza dos milhares	60
Tabela 8 - Impacto dos resultados individuais em relação à média, para resultados da ordem de grandeza das centenas, dezenas e unidades	60
Tabela 9 - Espalhamento da pasta cimentícia das amassaduras efetuadas (apresentação e interpretação).....	62
Tabela 10 - Condições climáticas durante a produção das misturas.....	63
Tabela 11 - Massa volúmica no estado fresco das amassaduras efetuadas (apresentação e interpretação).....	63
Tabela 12 - Massa volúmica aparente dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (apresentação e interpretação)	65
Tabela 13 - Volume de poros abertos dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (apresentação e interpretação)	67
Tabela 14 - Volume aparente dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (apresentação e interpretação)	68
Tabela 15 - Massa volúmica aparente dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (apresentação e interpretação)	69

Tabela 16 - Massa volúmica real dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (apresentação e interpretação).....	70
Tabela 17 - Porosidade aberta dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (apresentação e interpretação).....	71
Tabela 18 - Porosidade total dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (apresentação e interpretação).....	72
Tabela 19 - Porosidades referentes aos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes.....	73
Tabela 20 - Absorção de água dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (apresentação e interpretação).....	73
Tabela 21 - Coeficiente de capilaridade dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (apresentação e interpretação).....	75
Tabela 22 - Resistência à tração por flexão dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (apresentação e interpretação).....	77
Tabela 23 - Resistência à compressão dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (apresentação e interpretação).....	78
Tabela 24 - Velocidade de propagação de ultrassons dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (apresentação e interpretação).....	80
Tabela 25 - Módulo de elasticidade dinâmico dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (apresentação e interpretação).....	81

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

0%	-	Betão simples (Calda de cimento)
Abs.Água	-	Absorção de água [%]
Al	-	Alumínio
Al ₂ O ₃	-	Óxido de Alumínio
AM	-	SIMCON-BCC com cura efetuada em ambiente marítimo submerso
AT	-	SIMCON-BCC sujeito a cura padrão e exposição a altas temperaturas
C	-	Carbono
C2S	-	Silicato Bicálcico
C3A	-	Aluminato Tricálcico
C3S	-	Silicato Tricálcico
C4AF	-	Ferroaluminato Tetracálcico
C ₆ AS ₃ H ₃₂	-	Sulfoaluminato de Cálcio Hidratado (Etringite)
Ca	-	Cálcio
CA	-	SIMCON-BCC com cura efetuada em condições ambientais correntes
CaSO ₄	-	Sulfato de Cálcio (Gesso)
Ca(OH) ₂	-	Hidróxido de Cálcio (Portlandite)
CaCO ₃	-	Carbonato de Cálcio
CaO	-	Óxido de Cálcio
CC	-	Coeficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m ² .min ⁰⁵]
Cl ⁻	-	Ião Cloreto

CO₂ - Dióxido de Carbono

C-S-H - Silicato de Cálcio Hidratado

Cu - Cobre

CV - Coeficiente de Variação [%]

Dv.P - Desvio Padrão

Ed - Módulo de Elasticidade Dinâmico [GPa]

Esp - Espalhamento

Fe - Ferro

Fe₂O₃ - Óxido de Ferro

GD - SIMCON-BCC sujeito a cura padrão e exposição a ciclos de gelo/degelo

m - Quantidade de água absorvida por unidade de área em contacto com a água [kg/m²]

M. V. Ap - Massa Volúmica Aparente no Estado Endurecido [kg/m³]

m₁ - Massa do recipiente vazio [kg]

m₂ - Massa do recipiente cheio de pasta cimentícia [kg]

m_{imers} - Massa do provete imerso em água [kg]

m_{sat} - Massa do provete saturado [kg]

m_{seco} - Massa do provete seco [kg]

m_{t0} - Massa do provete seco, no início do ensaio [kg]

m_{ti} - Massa do provete decorrido determinado tempo t_i [kg]

M. V. Est. Fresco - Massa Volúmica Aparente no Estado Fresco [kg/m³]

M. V. Real - Massa Volúmica Real [kg/m³]

O - Oxigénio

Pa - Porosidade Aberta [%]

Pt	-	Porosidade Total [%]
Rc	-	Resistência à compressão [MPa]
Ref	-	SIMCON-BCC sujeito a condições de cura padrão
Rt	-	Resistência à tração por flexão [MPa]
s	-	Secção do provete que se encontra em contacto com a água [m ²]
Si	-	Silício
SiO ₂	-	Sílica
SO ₄ ²⁻	-	Ião Sulfato
V. P. Ab	-	Volume de Poros Abertos
V _{prov}	-	Volume dos provetes [m ³]
V. Ult	-	Velocidade de propagação de ultrassons [km/s]
V _{recip}	-	Volume do recipiente [L]
\bar{X}	-	Média
ρ_{rh}	-	Massa Volúmica da água a 20°C [998 kg/m ³]
A/L	-	Razão água-ligante
BRF	-	Betão Reforçado com Fibras
EN	-	European Norm [Norma Europeia]
ESTBarreiro/IPS	-	Escola Superior de Tecnologia do Barreiro do Instituto Politécnico de Setúbal
HR	-	Humidade Relativa [%]
IPQ	-	Instituto Português de Qualidade
ITZ	-	<i>Interface Transition Zone</i> (Zona de Transição Interfacial)
LNEC	-	Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NP - Norma Portuguesa

SIFCON - *Slurry-Infiltrated Fiber Concrete*

SIMCON - *Slurry-Infiltrated Mat Concrete*

SIMCON-BCC - *Slurry-Infiltrated Mat Concrete* de Baixo Custo Comercial

1. INTRODUÇÃO

A presente dissertação teve como objetivo a avaliação da durabilidade de *Slurry-Infiltrated Mat Concrete* (SIMCOM) de baixo custo comercial, doravante designado por SIMCON-BCC. O documento apresenta 7 capítulos sendo que neste primeiro capítulo se apresenta a temática alvo de estudo, o seu enquadramento, os objetivos que levaram à realização do trabalho e os métodos adotados para a caracterização do material. É também apresentada, de forma sucinta, a organização, estrutura e divisão da dissertação.

1.1. ENQUADRAMENTO

O betão, como principal elemento estrutural utilizado na construção tem a si associado a durabilidade de uma estrutura. Desta forma, e com o objetivo de aumentar a durabilidade das construções, o desenvolvimento de novos materiais, processos de construção e reabilitação tem vindo a ser cada vez maior. No entanto, o melhor desempenho do betão está intrinsecamente ligado a custos de fabrico e de aplicação.

O betão é um material compósito que resulta da mistura devidamente proporcionada de ligante, agregados finos e grossos, água, vazios e, eventualmente, adjuvantes e materiais de reforço como são as fibras. O processo de produção do betão convencional tem como objetivo garantir a homogeneidade deste material compósito, assegurando o correto envolvimento dos agregados por pasta de ligante. A esta zona de ligação dá-se o nome de zona de transição de interface e a ela está associada, entre outros, poros [BARBOSA, 2013].

O tipo e proporções de ligante e demais constituintes utilizados na produção do betão, bem como a utilização de aditivos e adições, influenciam as propriedades do material produzido. Apesar de existirem várias combinações possíveis entre os constituintes que dão origem ao betão simples, e às suas proporções, este apresenta resistências à tração significativamente inferiores quando comparadas com as resistências à compressão (cerca de 10% da resistência à compressão) [FERREIRA, 2000].

O recurso à utilização de elementos de reforço, como sejam varões e malhas metálicas, aumenta o desempenho mecânico do betão simples no que diz respeito a esforços de tração. A introdução de armaduras e/ou reforço com fibras de aço são métodos bastante utilizados para melhorar o desempenho do betão simples, nomeadamente a tenacidade e as resistências mecânicas. No caso específico da introdução de fibras de aço na matriz de

betão, obtêm-se betões com resistências mecânicas elevadas, com a possibilidade de se atingirem esbeltezas nas estruturas [BARROS, 1996].

No seguimento da utilização de fibras com o propósito de incrementar o desempenho mecânico do betão, e na tentativa de otimizar o processo de produção, surge o *Slurry-Infiltrated Mat Concrete* (SIMCON), caracterizado pela infiltração de uma pasta cimentícia numa manta de fibras de aço [BENTUR, 2007].

Em comparação com betões convencionais, o SIMCON apresenta várias vantagens associadas, nomeadamente uma melhoria das resistências mecânicas, uma maior ductilidade e um bom controlo de fissuração, resultando num betão com durabilidade melhorada [MURAKAMI ET AL, 1998].

Para que o betão consiga potenciar as suas características físicas terá de ser curado em condições padronizadas de humidade igual ou superior a 95% e de temperaturas de $20\pm 5^{\circ}\text{C}$. Tais condições dificilmente são reproduzidas em condições reais de aplicação do material [IPQ, 2009a].

Se na cura/endurecimento do betão não forem respeitadas as condições de cura padrão, tidas como referência, propicia-se a formação de poros, diminuição do desempenho mecânico e o aparecimento de fissuras [BARBOSA, 2013]. Sendo as condições de cura padrão respeitadas através da permanência do betão em contacto com a água do mar, este será afetado pela presença de sais marítimos, que afetam a matriz cimentícia bem como os elementos metálicos de reforço do betão [LIMA & MORELLI, 2004].

Quando o betão endurecido é exposto a variações de temperaturas entre os -20 e os 20°C , a água presente no interior do betão sofre alterações de entalpia, ao congelar e descongelar sucessivamente. As mudanças de estado da água criam pressões expansivas e de dilatação no interior do betão, que dão origem, entre outras, a vazios e por consequente a perdas de resistência mecânica [FERREIRA, 2000].

A exposição do betão depois de endurecido a temperaturas elevadas afeta as propriedades físico-químicas de forma considerável. O betão apresenta um bom comportamento em climas quentes, no entanto quando exposto a temperaturas na ordem dos 800°C verificam-se danos severos na sua estrutura e nas propriedades físicas e mecânicas muito devido à evaporação da água presente no interior do betão, que gera tensões que podem não ser suportadas pela matriz cimentícia [LIMA ET AL 2004].

1.2. OBJETIVO E MOTIVAÇÃO

O betão é um material amplamente utilizado, em todo o mundo, para a construção dos mais variados tipos de estruturas e perfaz mais do dobro da quantidade de todos os restantes materiais utilizados na construção, incluindo a madeira e o aço. Estima-se que, anualmente, são produzidos cerca de 25 mil milhões de toneladas de betão, aos quais estão frequentemente associados preços elevados [INÁCIO, 2014]. Importa, então, desenvolver um tipo de betão que consiga aliviar o custo elevado da sua produção sem desprezar a durabilidade, mesmo em condições de cura adversas e exposições a ambientes agressivos.

A presente dissertação teve como principal finalidade o estudo e compreensão do comportamento do SIMCON de baixo custo comercial (SIMCON-BCC) quando sujeito a condições de cura e a ambientes potencialmente agressivos. Através da produção de uma calda de cimento reforçada com lã de aço de baixo custo comercial, avaliou-se, primeiramente, a influência da presença da lã de aço de baixo custo comercial na matriz cimentícia e, posteriormente, o desempenho e durabilidade do SIMCON-BCC produzido sujeito a condições de cura adversas (condições ambientais correntes e ambiente marítimo submerso) e, após condições de cura padrão, sujeito à exposição a ambientes agressivos (ciclos gelo/degelo e a altas temperaturas).

No processo SIMCON preconizado, a manta de aço utilizada foi de baixo custo comercial, composta por lã de aço, a qual se fez infiltrar uma calda de cimento de alta resistência e fluidez adequada. Uma vez que na lã de aço as fibras se encontram distribuídas de forma aleatória, minimizaram-se as dificuldades associadas ao manuseamento e colocação das fibras e aliou-se o baixo custo comercial da sua produção.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O presente documento encontra-se dividido em 7 capítulos onde estão organizados os conhecimentos bibliográficos adquiridos, os materiais e métodos utilizados na produção e caracterização do SIMCON de baixo custo comercial, o tratamento de resultados e a apreciação dos mesmos, bem como as conclusões observadas.

No capítulo 1 encontra-se o enquadramento do tema abordado nesta dissertação, o objetivo e a motivação da sua realização, estabelecendo pontos de vista fundamentais para a realização do estudo produzido.

O capítulo 2 refere-se à pesquisa bibliográfica, com o objetivo de compilar conhecimentos fundamentais acerca da produção e evolução do betão, desde o betão simples até às técnicas de SIMCON, as etapas fundamentais e vantagens que deram lugar ao seu desenvolvimento.

No capítulo 3 são apresentadas as características e consequências que cada tipo de cura/ambiente agressivo tem sobre o betão e os seus constituintes metálicos, quer como conjunto, quer individualmente.

O capítulo 4 tem presente a campanha experimental efetuada para atingir os objetivos definidos para este trabalho. O capítulo encontra-se subdividido entre os materiais e a composição utilizados para a produção dos provetes, o plano de ensaios, as caracterizações (estado fresco e endurecido), as condições de cura e as diferentes exposições preconizadas.

No capítulo 5 encontram-se apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios realizados e apresentados no capítulo anterior. O espírito crítico aliado à aquisição de conhecimentos resultante da pesquisa bibliográfica permitiu uma discussão de resultados cuidada e que se chegasse a conclusões fundamentadas sobre o tema da dissertação.

O capítulo 6 contém, à semelhança do capítulo anterior, as considerações após análise e ponderação dos resultados obtidos. Apresentam-se as conclusões finais que compilam o comportamento do SIMCON de baixo custo comercial em cada caso de estudo. Descrevem-se as conclusões por caso de estudo e apresentam-se propostas para trabalhos futuros, com objetivo de aprofundar os conhecimentos científicos no âmbito do SIMCOM.

No último capítulo, Capítulo 7, apresentam-se as referências bibliográficas que serviram de suporte para a realização do trabalho aqui apresentado.

2. BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS

2.1. BETÃO

O betão é um dos materiais de construção mais utilizados no mundo, muito devido à acessibilidade financeira e de aquisição, aliado ao processo de produção e aplicação simples. Contudo o betão tem como debilidade a resistência a esforços de tração, originando fissuras (aberturas até 0,5mm de espessura) que ao se propagarem potencializam anomalias graves. O betão é um material formado por uma mistura devidamente proporcionada de diversos constituintes, como é o caso dos agregados finos e/ou grossos, água e um componente ligante, podendo ainda ser acrescentados adjuvantes e/ou adições, de forma a potencializar alguma característica requerida ou vista como fator de fragilidade [BRANDT, 2008].

O elemento ligante mais utilizado na produção de betão é o cimento, como principal elemento de ligação entre os restantes componentes que constituem o betão e, por isso, torna-se importante compreender como se desenrola o processo de fabrico do cimento, que se encontra esquematizado na figura 1 [TOSTA 2007].

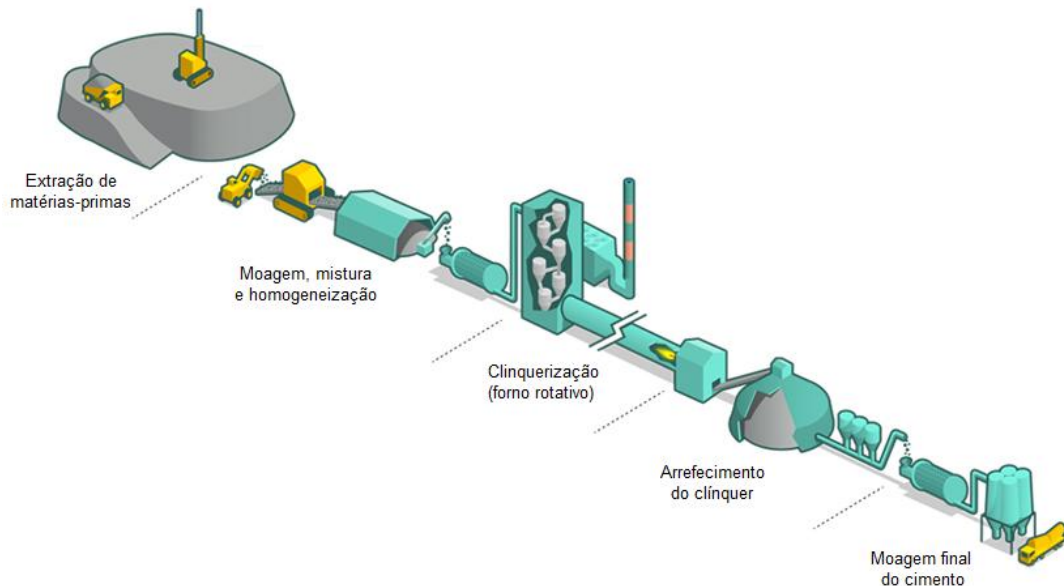


Figura 1 – Etapas de produção do cimento [VCIMENTOS, 2009]

O cimento do tipo Portland é composto por cálcio (Ca), silício (Si), alumínio (Al) e ferro (Fe), obtido através da extração de rochas de calcário, argila e marga com recurso a equipamentos mecânicos e a explosivos. O material após extração apresenta-se em blocos,

com dimensões até 1m³, seguindo para o britador de forma a reduzir o seu tamanho a uma granulometria adequada [VARELA 2005]. À saída do britador, obtém-se um material com dimensões entre 5 a 10cm que é posteriormente armazenado. Na etapa seguinte as matérias-primas são selecionadas das pilhas de armazenamento através de um corte vertical de forma a serem pré-homogeneizadas, retirando-se proporções adequadas dos constituintes, ao qual se dá o nome de “cru”. O material é novamente moído até obter dimensões inferiores a 150mm, seguindo para o forno [LIMA, 2011]. Antes de entrar no forno, a matéria-prima passa por uma fase de pré-aquecimento num dispositivo vertical denominado de torre de ciclones, onde o fluxo de gases provenientes do forno a jusante permite que a matéria-prima pré-aqueça. Ao atingir os 800°C dá-se a desidratação da argila e o carbonato de cálcio (CaCO₃) decompõe-se em óxido de cálcio (CaO) e em dióxido de carbono (CO₂). Já no interior do forno, inicia-se o processo de cozedura, também denominado de clinquerização, caracterizado pela obtenção dos componentes principais do clínquer (Tabela 1), através da queima a altas temperaturas da matéria-prima [GOMES, 2013].

Tabela 1 - Principais componentes do clínquer [GOMES]

Designação	Constituição química	Abreviatura
Silicato tricálcico	3.CaO.SiO ₂	C3S
Silicato bicálcico	2.CaO.SiO ₂	C2S
Aluminato tricálcico	3CaO.Al ₂ O ₃	C3A
Ferroaluminato tetracálcico	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C4AF

O processo de cozedura inicia-se a uma temperatura compreendida entre os 800 e os 1100°C no interior do forno e com a matéria-prima em estado sólido. A temperatura atingida faz com que ocorram reações entre o óxido de cálcio (CaO) proveniente do calcário e a sílica (SiO₂) proveniente da argila, formando-se o silicato bicálcico (2.CaO.SiO₂ = C2S), que contribui para a resistência mecânica a longo prazo [GOMES, 2013].

Na zona final do forno, onde se atingem temperaturas de 1450°C, o material passa para o estado líquido. O silicato bicálcico (C2S) reage com parte do óxido de cálcio (CaO) e transforma-se em silicato tricálcico (3.CaO.SiO₂ = C3S), componente mais representativo na composição final do cimento (50 a 80%), responsável pela resistência mecânica. No processo dá-se também a reação do óxido de cálcio (CaO) proveniente do calcário com os subprodutos alumina (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃) provenientes da argila e que dão início à formação de aluminato tricálcico (3CaO.Al₂O₃= C3A) e do ferro aluminato tetracálcico (4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃ = C4AF), responsáveis pelo alto calor de hidratação e elevada resistência química, respetivamente [VARELA 2005].

Ao sair do forno o material é arrefecido rapidamente através de contracorrente de ar até temperaturas de ±150°C, onde o composto solidifica e ganha uma morfologia esférica com

diâmetro entre 10 e 30mm, designado por clínquer. O arrefecimento brusco evita que o silicato tricálcico (C3S) se decomponha novamente em silicato bicálcico (C2S) e em óxido de cálcio (CaO) [SHIMADA, 1999].

Após o arrefecimento, o clínquer é moído conjuntamente com adjuvantes, que facilitam a moagem. A adição de gesso (sulfato de cálcio = $\text{Ca} \cdot \text{SO}_4$) ao clínquer atua como regulador de presa/rigidez ao combinar-se rapidamente com os aluminatos C3A e C4AF, dando origem a etringite (sulfoaluminato de cálcio hidratado = $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$), que protege da ação direta da água os silicatos C2S e C3S, responsáveis pela resistência mecânica [CATARINO, 2012].

As propriedades do cimento, nomeadamente o seu comportamento mecânico, dependem da sua composição química e da finura obtida na moagem (COSTA e APPLETON, 2002)

Quando o cimento é misturado com água durante a amassadura do betão ocorrem reações de hidratação que formam compostos estáveis que cristalizam e se interligam conferindo ao betão uma elevada resistência. A designação de ligante deve-se à propriedade de poder aglomerar uma proporção elevada de agregados de diferentes dimensões conferindo ao conjunto uma elevada coesão e resistência mecânica [YAN, 2013].

Os constituintes do clínquer que mais contribuem para as resistências mecânicas do cimento, e consequentemente do betão, são o C3S e o C2S, que se encontram envolvidos por uma matriz de C3A e de C4AF (estrutura constituída por cristais muito pequenos), tal como se observa na figura 2. [GOMES, 2013].

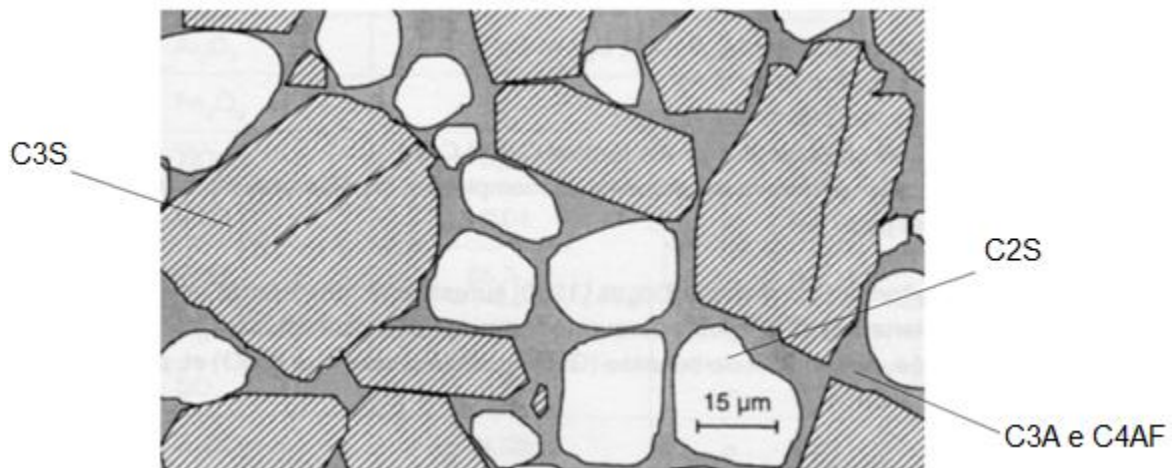


Figura 2 - Imagem esquemática da superfície de clínquer obtida por microscópio ótico (x100) [Adaptado de GOMES 2013]

A hidratação do C4AF é muito rápida, conferindo quase instantaneamente rigidez à pasta de cimento, diminuindo a sua trabalhabilidade. Conforme já referido, para evitar este comportamento repentino e indesejável adiciona-se gesso à composição do cimento (cerca de 4% da massa de clínquer). Quando o cimento é misturado com água, o sulfato de cálcio (CaSO_4) presente no gesso e os principais compostos do clínquer (C3S, C2S, C3A e C4AF)

iniciam um processo de dissolução na água [SILVA 2009]. Numa fase inicial ocorre, essencialmente a reação da água com o C3A, C3S e o gesso. A reação que envolve o gesso e o C3A origina a formação de etringite, que cristaliza na forma de agulhas [GOMES, 2013]. O C3S e o C2S reagem com a água e originam gel amorfo de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), componente responsável pela resistência mecânica do betão e que ocupa aproximadamente 55% do volume de cimento [GARCIA, 2007].

O hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , também designado por Portlandite, constitui cerca de 20 a 25% do volume de sólidos da pasta de cimento hidratada. Esta fase tem uma morfologia bem definida, sendo constituída por cristais com a forma de prismas hexagonais de grandes dimensões. O contributo desta fase para a resistência mecânica é bastante inferior ao da fase C-S-H [GOMES, 2013].

As características do betão dependem da proporção dos seus constituintes como também do tipo, quantidade e distribuição de vazios. O crescimento dos cristais C-S-H origina uma presença significativa de vazios que se designam por poros, suficientemente pequenos ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$) para não afetarem a resistência mecânica e a permeabilidade da pasta de cimento endurecida. Porém, em condições extremas de secagem, a evaporação da água presente nos poros contribui para a retração do betão (diminuição do volume por secagem), através da segregação (dissociação dos constituintes) que dá origem à contração e posterior encolhimento da pasta de cimento [GOMES, 2013].

No estado fresco, a pasta de cimento apresenta uma consistência viscosa que no processo, pós-amassadura do betão, solidifica. No entanto, existem espaços que acabam por não ser preenchidos pelos compostos do cimento hidratado e que dão origem aos chamados poros capilares, aquando da evaporação da água. A quantidade e dimensão dos poros capilares está dependente da razão A/L (água/ligante), que quanto maior for, maior será a distância entre as partículas de cimento na pasta [GOMES, 2013].

A NP EN 206-1:2007 classifica os betões segundo a resistência à compressão (aos 28 dias), exposição ambiental, teor de cloretos, máxima dimensão do agregado mais grosso e consistência [IPQ, 2007a]. E a especificação do LNEC E464-2007 [LNEC, 2007] fornece indicações para a produção de betão mediante a seleção das características mencionadas anteriormente.

2.2. BRF (BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS)

A técnica de reforço de materiais de construção pela inserção de fibras na sua matriz é proveniente desde, pelo menos, 1200 a.C., com os Egípcios, tal como se encontra descrito na Bíblia (ÊXODO 5). Vários autores, como Bentur et al (2007), Canovas (1997), Johnston (1994) e Figueiredo (2000), afirmam que os reforços envolviam a incorporação de fibras de origem vegetal e animal em construções de argila [QUININO, 2015].

As primeiras fibras empregues na construção civil, sem carácter artesanal, foram as fibras de amianto, no princípio do século XX, para produção de elementos de pequena espessura, como painéis, telhas e placas. O início do estudo científico sobre o comportamento destes compósitos deu-se por volta da década de 50, com a entrada das fibras de aço e vidro,

estudadas por Bentur et al em 1990. As fibras poliméricas começaram a ser utilizadas poucos anos depois, em 1965, e atualmente, as fibras de maior utilização são as de polipropileno, com maior expressividade do que as fibras de nylon®, poliéster, polietileno, celulose e kevlar® [TANESI ET AL, 1999]. De entre os materiais metálicos, as fibras de aço são as mais utilizadas no reforço do betão e são compostas de aço macio ou duro, podendo apresentar revestimento e proteção anticorrosiva.

Conforme já referido, a principal limitação do betão reside na sua baixa resistência quando sujeito a esforços de tração (cerca de 10% da resistência à compressão) e na sua baixa capacidade de deformação antes da rotura, tal como estudado por Mehta et al em 2014. Esta discrepância de valores de resistência a esforços de compressões e de tração existe porque os esforços de compressão dão origem a fissuras independentes e de pequenas dimensões, enquanto os esforços de tração se caracterizam pela abertura de fendas que se unem, reduzindo a superfície de rotura e capacidade de absorção de energia [QUININO, 2015].

Com a adição de fibras ao betão vem a melhoria da capacidade de absorção de energia, das resistências mecânicas, da tenacidade (energia que o betão absorve antes de atingir a rotura) e da ductilidade (grau de deformação suportado antes da rotura). Incorporando fibras relativamente pequenas, discretas e descontínuas na pasta cimentícia, o comportamento à tração e o controlo do aparecimento de fissuras é melhorado, sendo a fissuração um dos maiores problemas para as estruturas de betão, por permitir a entrada de agentes agressivos [MINDESS ET AL, 2002]. Dadas as suas pequenas dimensões, as fibras podem distribuir-se de forma dissimulada na matriz cimentícia e tornam-se eficientes no controlo da microfissuração (aberturas com espessura inferior a 0,2mm), dificultando a união de fissuras [QUININO, 2015].

No que se refere às resistências mecânicas, Bentur e Mindess em 2007 afirmaram que o objetivo da adição de fibras ao betão é o de melhorar a resistência à tração por flexão, esperando-se também alterações na resistência à compressão. Um decréscimo da resistência à compressão pode dever-se ao facto da adição de fibras ser acompanhada pela adição de água, de forma a aumentar a trabalhabilidade das misturas, o que tem como consequência o surgimento de poros e a diminuição da resistência à compressão do betão. No entanto, um estudo realizado por Williamson em 1974 revelou um acréscimo até 20% da resistência à compressão para um betão com 2% de teor de fibras [BRAZ, 2015].

Na figura 3 pode observar-se os efeitos da adição de uma pequena quantidade de fibras de aço (forma reta com 0,4mm de diâmetro e 0,25mm de comprimento), que reduz de forma significativa a abertura de fissuras no betão [ACI Committe 544, 1997].

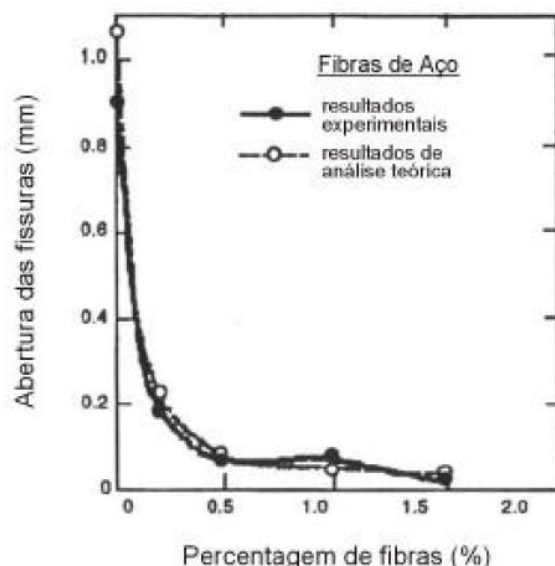


Figura 3 - Largura média de abertura de fissuras a variar com volume de fibras [ACI544.1R-96]

As fibras de aço utilizadas para reforçar betão têm uma esbelteza (razão comprimento/diâmetro) entre 20 e 100 e são pequenas o suficiente (entre 15 a 75 mm) para que se possam dispersar de forma fácil e aleatória na pasta de betão fresco. As fibras de aço podem ser classificadas consoante as geometrias e o processo de fabrico. Quanto à sua morfologia existem dois tipos de classificação, dependendo da sua secção transversal, existindo as de secção constante (retangular ou circular) e as que apresentam secção variável. Dentro do processo de fabrico, existem fibras com a extremidade achatada, com a forma de gancho, onduladas e rugosas, com a finalidade de melhorar a ligação entre a fibra e a matriz através da aderência (Figura 4). Quanto à composição, o aço utilizado para a produção das fibras pode ser macio ou duro, podendo apresentar revestimento e proteção anticorrosiva. As características principais na seleção do tipo de fibra a utilizar são a esbelteza e a forma, fundamentais para garantir aderência [ACI Committe 544, 1997].

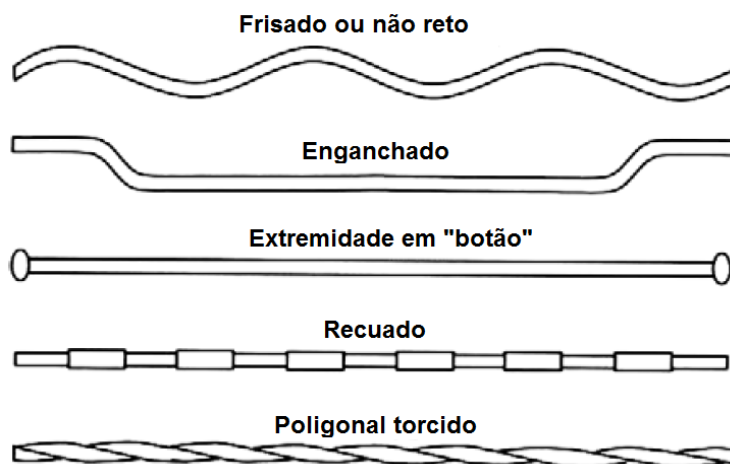


Figura 4 - Exemplos de fibras de aço deformada [Adaptado de BRANDT, 2008]

Como já referido, as fibras finas controlam a abertura e a propagação de microfissuras, uma vez que são amplamente dispersas na matriz de cimento. Fibras com comprimento compreendido entre 50 a 80mm ajudam a controlar fissuras de grandes dimensões e contribuem para o aumento da resistência final do betão, como ilustrado na figura 5 [BRANDT, 2008].

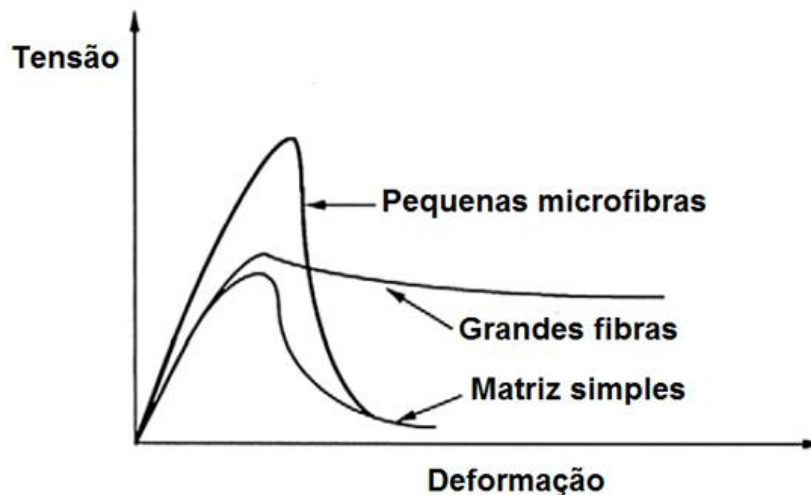


Figura 5 – Influência do tamanho das fibras no controlo de tensão e deformação [Adaptado de BRANDT, 2008]

Segundo Gregory em 2002, o betão reforçado com fibras é cada vez mais utilizado em estruturas de engenharia como pontes, pavimento, tubulações, coberturas, plataformas “offshore” e tanques de armazenamento submersos. Os tipos de estruturas mencionadas estão sujeitas a solicitações variadas, decorrentes de carregamentos uniaxiais e biaxiais, de fadiga, ou através da ação do vento, água, humidade e temperatura [BERNARDI, 2003].

2.3. SIFCON (SLURRY INFILTRATED FIBRE CONCRETE)

O BRF (Betão Reforçado com Fibras) é utilizado pela melhoria de algumas características do betão simples, contudo a resistência a esforços de flexão não consegue acompanhar a melhoria das restantes características, dando-se a ocorrência de fissuras no betão [BAYASI ET AL, 1997]. De forma a potenciar as características do betão é necessária a introdução de uma maior percentagem de fibras, uma vez que o procedimento de fabrico do BRF limita a volumetria de fibras a cerca de 3%. Esse volume de fibras foi superado por David Lankard em 1982, através da infiltração de pasta cimentícia numa fração de volume de fibras de aço compreendido entre 3 e 15%, denominada de SIFCON (*Slurry Infiltrated Fiber Concrete*) [MURAKAMI ET AL, 1998].

No SIFCON, a mistura de cimento é infiltrada num aglomerado de fibras de aço curtas previamente cortadas e dispostas em moldes, com recurso a fluxo de gravidade, auxiliado

pela vibração suave ou por injeção de pressão (Figura 6). O composto resultante apresenta alta resistência e ductilidade, com a versatilidade de poder ser moldado. Os compósitos SIFCON diferem do BRF convencional por apresentarem uma maior fração volumétrica de fibras (aproximadamente 10% do volume de ligante, podendo ir até cerca de 25%), utilizando uma matriz cimentícia composta de partículas muito finas (<3mm) [ACI Committee 544, 1997].



Figura 6 - Processo de produção do SIFCON [INZYNIERBUDOWNICTWA, 2009]

No SIFCON torna-se difícil uniformizar a distribuição das fibras de aço na pasta cimentícia, o que faz com que as fibras percam a disposição original com que foram colocadas no molde, e por conseguinte a distribuição desejada [MURAKAMI ET AL, 1998]. Na figura 7 observa-se as curvas típicas da tensão/extensão do BRF e do SIFCON [NAAMAN, 1987].

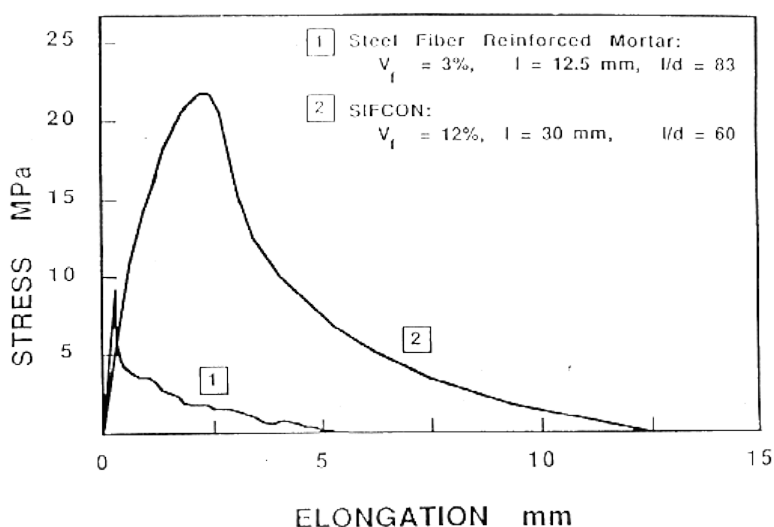


Figura 7 - Curvas típicas da tensão/extensão do BRF e do SIFCON [Naaman 1987]

Apesar do SIFCON conseguir atingir maiores resistências mecânicas e energias de absorção do que o betão simples e o BRF, conforme demonstrado na figura 8, este processo requer a utilização de um grande número de fibras, cerca de 15% da massa de ligante, como estudado por Hackman et al em 1992, o que se torna difícil de executar fora do ambiente laboratorial [COSKUN, 2002].

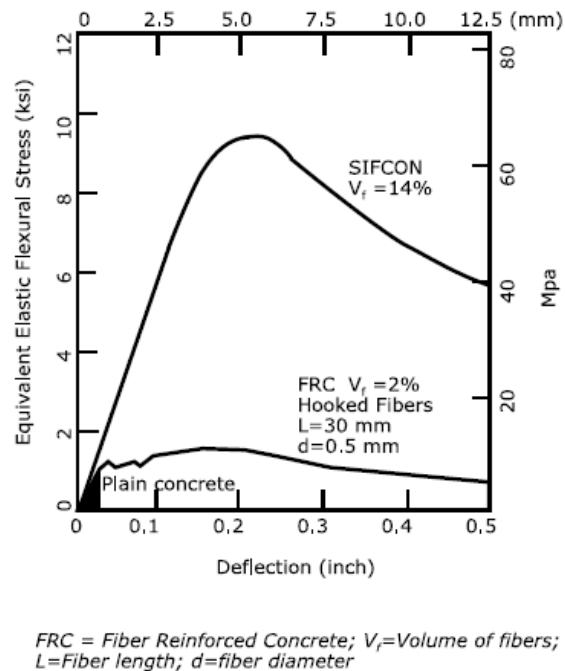


Figura 8 - Comparação das curvas de tensão-extensão do SIFCON, do BRF com 2% de fibras de aço e de betão convencional sem reforço, carregada em 3 pontos de flexão [COSKUN, 2002]

A orientação das fibras é a variável mais significativa a afetar o comportamento e desempenho do SIFCON, sendo as técnicas de fabrico e as dimensões do elemento final as condicionantes que podem afetar a orientação e dispersão das fibras na matriz cimentícia. Mesmo sendo reproduzido o procedimento de fabrico, os produtos finais podem apresentar propriedades diferentes entre si, por vezes expressivos. Isso significa que é necessário um cuidado especial na utilização de modelos analíticos para prever o comportamento de elementos estruturais fabricados a partir do processo SIFCON [WOOD, 2000].

Embora a maioria dos estudos acerca das propriedades mecânicas do SIFCON se tenham debruçado sobre as resistências mecânicas, alguns abordaram as propriedades de tensão, cisalhamento e ductilidade. Os valores das resistências à compressão do SIFCON variaram entre 21 e 140MPa e a resistência à tração por flexão pode atingir valores de 40MPa. Tal como sucede com os restantes tipos de betão, podem ser obtidas resistências mecânicas mais elevadas, com recurso à utilização de aditivos como cinzas volantes, micro sílica e adjuvantes.

Uma vez que o SIFCON, muito devido à colocação e corte das fibras em moldes se torna uma técnica com custos elevados associados, apenas as aplicações que requerem

resistências muito elevadas justificam o processo. Nessas aplicações estão incluídas estruturas que se querem resistentes a impactos, explosões, refratários e revestimentos protetores [ACI Committe 544, 1997].

2.4. SIMCON (SLURRY INFILTRATED MAT CONCRETE)

O SIMCON (*Slurry Infiltrated Mat Concrete*), à semelhança do SIFCON (*Slurry Infiltrated Fiber Concrete*), é um tipo de betão de alta resistência feito a partir da infiltração de pasta cimentícia em fibras de aço previamente dispostas em moldes [SHANNAG, 2001]. As fibras que compõem a manta de fibras são normalmente de aço inoxidável, que diminui e/ou retarda a ocorrência de corrosão [COSKUN, 2002].

Hackman et al em 1992 desenvolveram o procedimento de seleccionar entre 3 a 6% de volume de fibras de aço bidimensionais sob a forma de manta, preparada em fábrica, colocada num molde e infiltrada por uma pasta de cimento e, posteriormente, sujeita a vibração externa para garantir uma distribuição uniforme dos constituintes [MURAKAMI ET AL, 1998].

As fibras de aço do SIMCON são mecanicamente recolocadas sob a forma de manta, com a forma de um rolo densamente compacto e efetuado conforme as especificações de espessura, volume e morfologia das fibras. O SIMCON quando comparado com o BRF (Betão Reforçado com Fibras) permite que o volume, o comprimento e a esbelteza das fibras aumentem, correspondendo a um ganho de resistência à tração por flexão, entre outras propriedades. Além do referido, as fibras de aço são distribuídas aleatoriamente pelo betão, o que tem um efeito positivo na distribuição dos esforços de tração [BAYASI ET AL, 1997].

Para betões reforçados com fibras é importante a esbelteza (razão comprimento/diâmetro) do reforço a utilizar, quanto maior for a esbelteza das fibras menores serão as fissuras no betão. No SIMCON a esbelteza das fibras pode atingir até 4 vezes a esbelteza das fibras utilizadas no BRF. Quanto ao comportamento na rotura, tanto o BRF como o SIFCON apresentam formação de fissuras com alguma dimensão que se ligam entre si. No SIMCON as fissuras são de menores dimensões e não se ligam entre si, estando mais dispersas. A dissipação das fissuras deve-se à distribuição uniforme das fibras no betão e consequente distribuição de esforços pelo mesmo, evitando o aparecimento de fissuras de grande largura e profundidade [COSKUN, 2002].

No SIFCON é difícil obter fibras de aço uniformemente distribuídas devido ao processo manual de dispersão. No SIMCON, no entanto, uma distribuição uniformemente de fibras pode ser facilmente conseguida devido ao uso de esteiras de fibra de aço pré-fabricadas. Tal homogeneidade é um fator benéfico para a ductilidade, tenacidade e comportamento sísmico do betão [MURAKAMI ET AL, 1998].

O SIMCON apresenta vantagens perante o SIFCON, por apresentar as fibras de aço sob a forma de manta, como representado na figura 9, em vez de dispersas, sendo a sua colocação e manuseamento em obra consideravelmente mais exequíveis [COSKUN, 2002].



Figura 9 – Exemplo de manta de fibras SIMCON [COSKUN, 2002]

Investigações levadas a cabo por Hackman et al em 1992 mostraram que no SIMCON, onde se utilizaram metade do volume de fibras utilizadas no SIFCON, conseguiram-se obter resistências equivalentes. Também se concluiu que na rotura por flexão as amostras de SIFCON apresentaram uma fissura única com dimensão considerável enquanto o SIMCON, na mesma situação, apresentou múltiplas fissuras com dimensões inferiores às que ocorreram no SIFCON, o que indica que a dispersão das fibras de aço na matriz apresentou melhores resultados no SIMCON [BAYASI ET AL, 1997].

Com o SIMCON, apesar de se utilizar um volume inferior de fibras consegue-se alcançar resistências, capacidade de absorção de energia e ductilidade equivalentes ou superiores às do SIFCON, tal como representado na figura 10 [MURAKAMI ET AL, 1998].

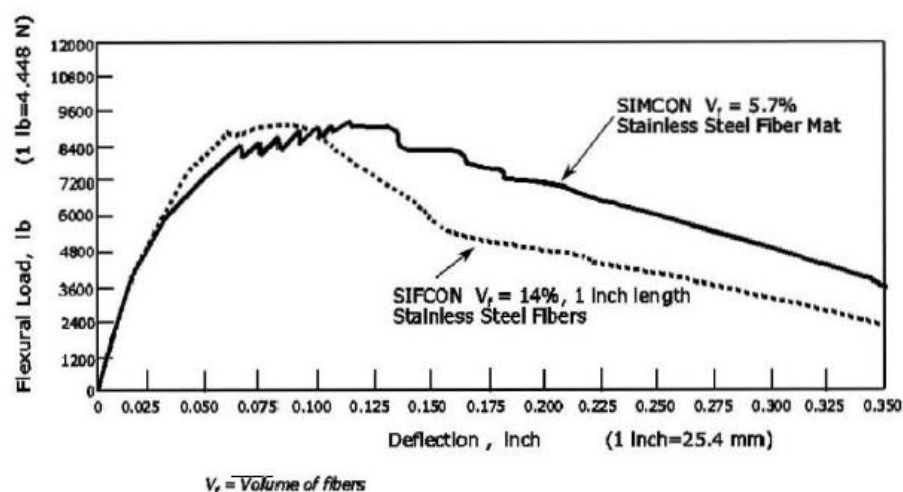


Figura 10 - Comparação do comportamento à flexão de SIFCON e SIMCON [COSKUN, 2002]

Segundo a investigação realizada por Krstulovic et al em 1999, os efeitos da orientação das fibras na resistência mecânica do SIMCON não tiveram diferenças quando comparadas com amostras com fibras orientadas em diferentes sentidos. O mesmo não se verifica para o BRF e para o betão SIFCON. A dispersão e entrelaçamento das fibras dentro da manta bem como o comprimento e esbelteza das fibras de aço utilizadas no SIMCON é maior do que as utilizadas no SIFCON e BRF, chegando-se a maiores resistências mecânicas [COSKUN, 2002].

O recurso à utilização de um grande volume de fibras pode potencializar o efeito de parede, que se entende pela aglomeração de partículas finas presentes no betão junto às fibras ou às faces do molde de cura, conduzindo ao empobrecimento e aparecimento de porosidades na pasta cimentícia. Por outro lado a presença de elevados volumes de fibras num betão podem dar aso ao efeito de parede duplo, que consiste no estrangulamento da pasta de cimento ao encontrar o aglomerado de fibras, que se encontram muito próximas umas das outras. Os grãos de cimento sofrem um efeito de filtragem, provocando um aumento na razão A/L na área entre as fibras [BAYASI ET AL, 1997]

2.5. SIMCON-BCC (SLURRY INFILTRATED MAT CONCRETE DE BAIXO CUSTO COMERCIAL)

O conceito de *Slurry Infiltrated Mat Concrete* de baixo custo comercial (SIMCON-BCC) é o de potenciar a aplicação comercial do SIMCON (*Slurry Infiltrated Mat Concrete*) e de se obter um material de baixo custo comercial sem que se perca a grande resistência e tenacidade, características do SIMCOM [VOLTAAOCONHECIMENTO, 2016].

O SIMCON-BCC é uma variante do SIMCON, onde a manta de fibras é substituída por lâ de aço de baixo custo comercial, de forma a não se perder a analogia do SIMCON mas tentando reduzir os custos associados à sua produção sem perder as características mecânicas que o distinguem. A lâ de aço apresenta propriedades físicas que vão de encontro às propriedades das fibras utilizadas no SIMCON, caracterizadas pela elevada esbelteza e pela orientação e disposição das fibras numa manta [DIAS, 2015].

Com a introdução de lâ de aço na matriz cimentícia, a durabilidade do betão aumenta como referido em 2.4., reduzindo a largura das fissuras resultantes de esforços de tração à flexão. Uma vez que não é possível evitar por completo a fissuração no betão, o objetivo é evitar que as fissuras ocorram, de forma a preservar a sua durabilidade a longo prazo, através da infiltração da pasta cimentícia na lâ de aço, obtendo-se como produto final um material no estado endurecido com um aspeto na superfície de fratura semelhante ao representado na figura 11 [MASTER-BUILDERS-SOLUTIONS, 2017].



Figura 11 – Aparência interior do SIMCON [ARMITA]

3. AMBIENTES AGRESSIVOS

3.1. CURA EM CONDIÇÕES AMBIENTAIS CORRENTES

A norma NP EN 12390-2:2009 referente à execução da cura de provetes para ensaios no estado endurecido, indica prescrições para que o betão, através de condições específicas de cura, seja otimizado em termos de desempenho físico, mecânico e químico. Os provetes de betão após betonagem devem permanecer nos moldes entre 16 a 72 horas, protegidos contra choques físicos, vibrações e sem sofrerem desidratação. A gama de temperaturas caracteriza-se pelos $20\pm5^{\circ}\text{C}$ para climas temperados e $25\pm5^{\circ}\text{C}$ para climas quentes. Após remoção dos moldes, os provetes são curados até imediatamente antes do ensaio, em água à temperatura de $20\pm2^{\circ}\text{C}$, ou em câmara a $20\pm2^{\circ}\text{C}$, e humidade relativa igual ou superior a 95%.

A presença de água juntamente com o cimento forma condições ótimas para uma hidratação contínua do cimento, com o propósito de se atingir a tensão de rotura máxima do betão quando endurecido. O fenómeno de condensação capilar, compreendida pela evaporação da água no interior do betão está dependente da humidade relativa do ar que rodeia o elemento de betão. Desta forma, a otimização das resistências mecânicas está dependente da cura e conservação do betão em ambientes de humidade relativa igual ou superior a 95%. [COUTINHO, 1994]

A qualidade do betão endurecido é fortemente afetada pelo processo de cura adotado, reforçando-se que uma cura caracterizada pela constante hidratação do elemento de betão inibe a propagação de poros e previne a perda de resistências mecânicas [QUININO, 2015].

A retração, caracterizada pela diminuição de volume da pasta cimentícia devido à evaporação de água de amassadura e das reações de hidratação do cimento, depende da quantidade de água que o betão perde durante o processo de cura. Quanto maiores forem as perdas de água para o meio ambiente, maiores serão as retrações, dificultando a obtenção da resistência mecânica pretendida. A retração que o betão apresenta é pronunciada e linear para valores de humidade relativa do ar dos 100 aos 75%. Abaixo dos 75% de humidade relativa, o aumento da retração dá-se de uma forma mais ténue, tal como apresentado na figura 12 [COUTINHO, 1994].

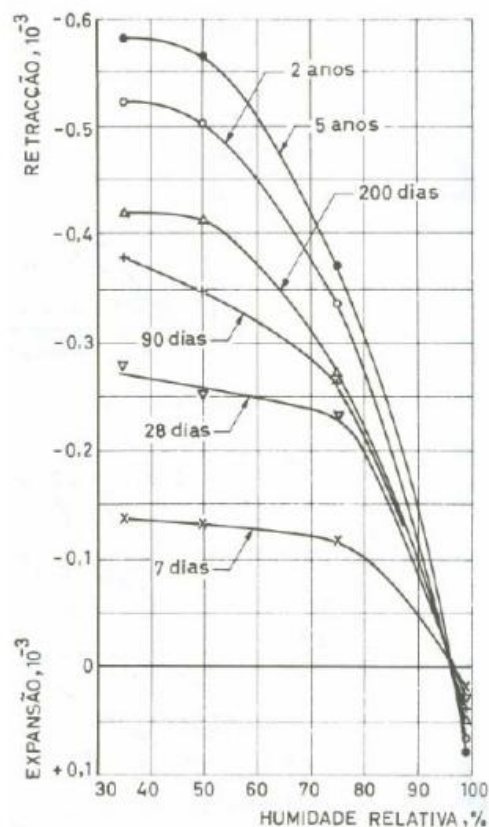


Figura 12- Relação entre umidade relativa do ar e expansão/retração do betão [COUTINHO, 1994]

Se o teor de umidade relativa do ar na cura do betão for inferior a 95%, o betão sofrerá retração, dando origem ao aparecimento de poros e fissuras. A retração depende de fatores para além da umidade, nomeadamente a quantidade e propriedades dos agregados utilizados, a dimensão e forma do elemento de betão, sendo a hidratação durante a cura a mais condicionante, como referido anteriormente [BARBOSA, 2013].

Na exposição a condições atmosféricas, nos primeiros dias de cura, a perda de água é elevada, enquanto a retração aumenta de forma reduzida, ao contrário do que se verifica no restante período de cura, em que a retração aumenta bastante com a diminuição progressiva da perda de água do betão [COUTINHO, 1994].

Quando o betão está em equilíbrio com o ambiente, significa que o teor de água (umidade) e a temperatura no seu interior são equivalentes aos do ambiente que o rodeia. No caso de o betão estar a secar, devido à diferença de humidades, existe perda de água para o meio ambiente até que se dê o equilíbrio. Existe um conjunto de fatores que influenciam o teor de umidade no betão, sendo eles o tipo de cimento, o tipo e quantidade de agregados, a relação A/L (água/ligante), as condições de cura, de secagem e a espessura do elemento de betão [LEAL, 2015].

A problemática associada às diferenças de humidades entre o betão e o ar está relacionada com a carbonatação, compreendida pela reação do dióxido de carbono (CO_2) com os

constituintes do betão. O CO_2 presente na atmosfera difunde-se para o interior do betão através dos poros e da rede capilar. Ao reagir com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) do cimento Portland e com as moléculas de água (H_2O), o CO_2 dá origem ao ácido carbónico (H_2CO_3), que afeta os componentes metálicos presentes no betão (corrosão). A carbonatação ocorre no interior do betão, de uma forma lenta, à medida que a humidade do betão é libertada, preservando o equilíbrio entre a humidade atmosférica e a do interior do betão [FERREIRA, 2000].

3.2. CURA EM AMBIENTE MARÍTIMO SUBMERSO

Os oceanógrafos que classificam os elementos distribuídos nos oceanos concluíram que existem cerca de 35 gramas de sais dissolvidos por cada quilograma de água do mar. Isso significa que a água do mar é constituída por 96,5% de água pura e 3,5% de sais, tendo como principais constituintes os iões cloreto, sódio, sulfato, magnésio, cálcio e potássio. Estes constituintes estão diretamente associados à propriedade da água do mar conhecida como salinidade e surgem com as percentagens presentes na figura 13 [LIMA & MORELLI, 2004].

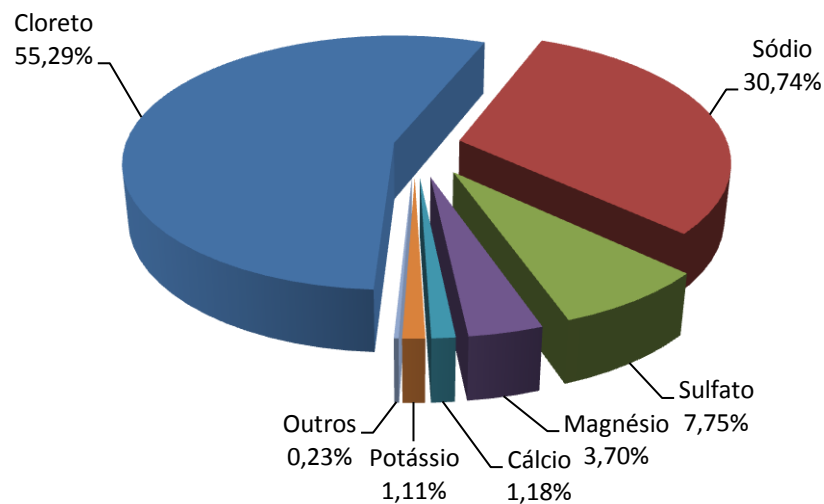


Figura 13 - Proporção entre os principais elementos constituintes de uma típica amostra de água do mar com salinidade de 35g/L [Adaptado de LIMA & MORELLI, 2004]

A nocividade do ataque dos sais marítimos resulta da libertação de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), entendido como processo de lixiviação. Na presença de água do mar, existem dois tipos de formações que dão origem a dois tipos de ataques diferentes. A formação de gesso proporciona o ataque de sulfatos, que é tipicamente um ataque por sais, onde se verifica a perda de coesão entre os compostos do cimento e consequentemente, um aumento de porosidade e, posterior perda de resistência. Por outro lado, a formação de etringite (produto final da reação entre o C3A do cimento e os sulfatos) gera tensões no interior do betão devido ao volume aparente da mesma, que

equivale ao dobro dos reagentes que lhe deram origem e podem conduzir à fissuração [DOTTO, 2006].

A maioria dos problemas de durabilidade de estruturas de betão em ambiente marítimo está relacionada com o ataque por sulfatos e com a corrosão de elementos metálicos presentes no betão. Como as agressividades marítimas ao betão estão associadas a características diferentes do ambiente em causa, a norma NP EN 206-1 [IPQ, 2007a] apresenta o ambiente marítimo dividido em diferentes zonas/classes, tal como representado na figura 14. Essa divisão por zonas caracteriza-se pela forma como a água do mar entra em contacto com o betão [LIMA & MORELLI, 2004].

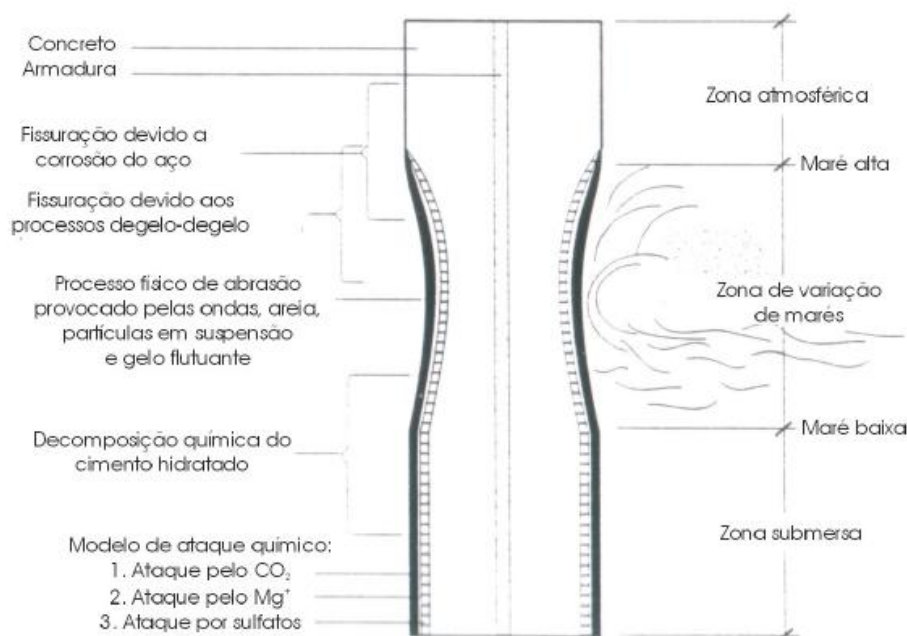


Figura 14 - Apresentação das distintas regiões (zonas) de agressividade às estruturas de betão [Adaptado de LIMA & MORELLI, 2004]

Na zona submersa, o betão encontra-se permanentemente em contacto com os sais dissolvidos na água do mar e potencia-se a degradação. Numa primeira instância, os sais de magnésio e de sulfato são os principais causadores de degradação no betão submerso em água do mar, sendo que a sua ação influente é notória a longo prazo [LIMA & MORELLI, 2004].

Os iões cloreto (Cl^-), principal componente químico da água do mar (aproximadamente 55%), ao serem absorvidos pelo betão, através dos poros e da rede de capilares, propiciam o contacto com os elementos metálicos. A interação dos sais marítimos com os metais presentes no betão proporciona a oxidação do ferro (Fe), elemento principal do aço que sofre desgaste químico o enfraquece mecanicamente [DOTTO, 2006].

Se considerarmos cada ião de forma isolada, pode afirmar-se que o betão é severamente afetado pela água do mar. No entanto, e devido à ação conjunta dos iões de cloreto (Cl^-) e

ião sulfato (SO_4^{2-}), a degradação provocada é atenuada. Os iões Cl^- amenizam e inibem a ação dos iões SO_4^{2-} ao reagirem com os aluminatos de cálcio do cimento, dando lugar ao cloro aluminato de cálcio hidratado, que apresenta menor volume que a etringite, proveniente da reação de SO_4^{2-} com o cimento. Se o cimento utilizado apresentar clínquer com grande quantidade de C3A e o grau de saturação for elevado, como se verifica em ambientes marítimos, os cloretos podem não evitar a formação de etringite. É recomendado o uso de cimentos com baixos teores de C3A para betões em contacto com a água do mar, como é o caso do cimento CEM I 52.5R, utilizado no presente trabalho. O ataque por sulfatos é a degradação mais significativa que acontece no betão em contato com a água do mar [LIMA & MORELLI, 2004].

Admitindo a corrosão como principal fator de desgaste do betão reforçado com materiais metálicos submerso em água marítima, importa perceber que o betão é um material permeável e poroso [KULISCH, 2011].

O ambiente marítimo como ambiente agressivo para o betão é caracterizado pelas ações químicas dos constituintes salinos presentes na água do mar. O ataque do ambiente marítimo sobre o betão estudado na presente dissertação diz respeito aos sais constituintes da água do mar como principal fator de degradação, uma vez que o elemento se encontra completamente submersos em água marítima. A zona submersa na água é relativamente estável e, ao contrário de zonas mais superficiais do mar, nesta não ocorre congelamento do betão nem corrosão total das armaduras. A ação de deterioração predominante é o ataque químico que provoca perda de resistência bem como a permeabilidade e a difusão do betão [FERREIRA, 2000]

3.3. EXPOSIÇÃO A CICLOS DE GELO/DEGELO

O betão, enquanto material poroso, é capaz de armazenar água no seu interior, esse fator aliado à exposição a temperaturas negativas e posterior congelamento da água consiste num problema a ter em conta na exposição do betão a ciclos de gelo/degelo. No processo de congelamento a água proveniente do meio ambiente preenche os vazios presentes no interior do betão que, após congelamento, aumenta de volume. A quantidade remanescente de água não congelada movimenta-se pelos capilares, causando pressão nas paredes internas do betão à sua passagem [LIMA e LIBORIO, 2009].

As pressões expansivas no betão surgem pelo aumento de volume da água ao congelar em cerca de 9% e à expulsão da água em excesso ou pelo simples facto da difusão de água, originando o crescimento de corpos de gelo [FERREIRA, 2000].

A deterioração proveniente deste processo decorre, principalmente, da incapacidade do betão absorver o acréscimo de volume que a água sofre ao congelar. Esta incapacidade deriva da dificuldade de redistribuição da massa de água infiltrada pelo betão durante este fenómeno, seja devido ao elevado grau de saturação do betão, pela dificuldade do escoamento pela estrutura porosa, ou ainda, pela elevada velocidade de arrefecimento do elemento de betão. A exposição do betão, enquanto húmido, a ciclos de gelo/degelo, provoca uma degradação nas suas camadas superficiais e conduz ao aparecimento de fissuras [YAN, 2013].

Uma vez que o congelamento do betão ocorre na presença de água, o processo dá-se, primeiramente, pela formação de gelo próximo da superfície, a uma temperatura próxima dos 0°C, e é seguido de uma sequência progressiva de acontecimentos. A água nos capilares próximos da superfície solidifica e expande, onde o excesso de água ainda em estado líquido migra para regiões mais internas do elemento de betão (Zona A da figura 15). Sempre afetada pela temperatura negativa da água a jusante, a água a montante, ainda em estado líquido (Zona B da figura 15), vai congelar também [LIMA e LIBORIO, 2009].

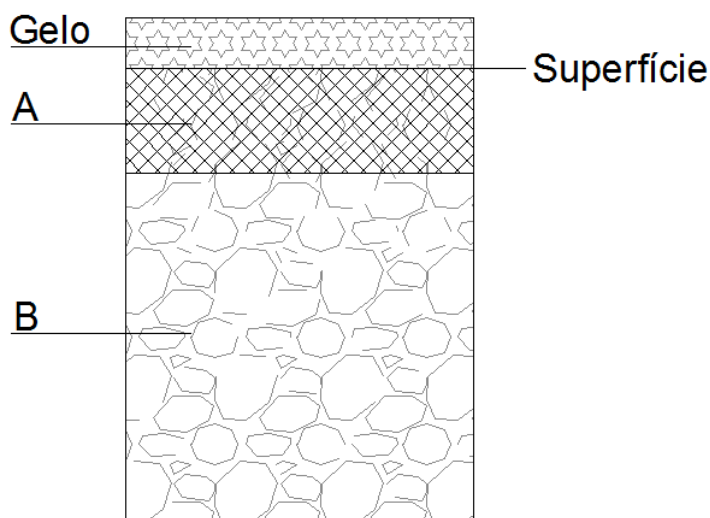
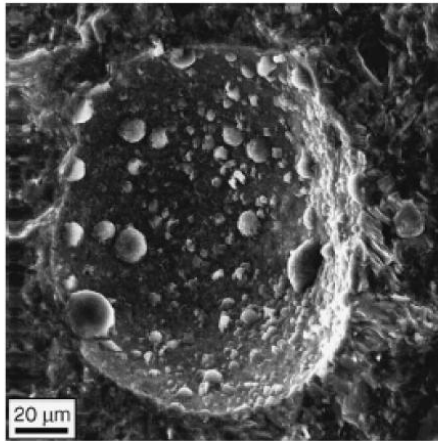


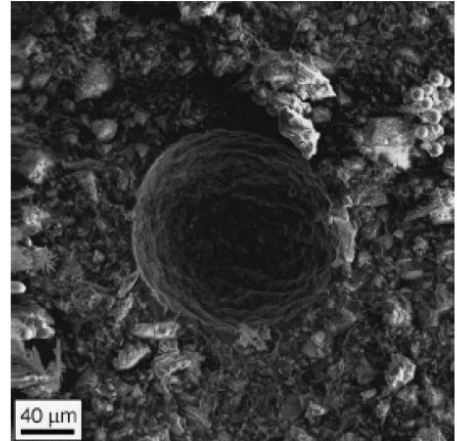
Figura 15 - Seção transversal esquemática de um corpo de prova de betão submetido ao arrefecimento
[Adaptado de LIMA e LIBORIO, 2009]

A teoria das pressões hidráulicas torna-se mais válida para betões que apresentam um elevado grau de saturação ao congelar. A circulação de água dentro do betão é apontada como sendo a maior causa de degradação em betões sujeitos a longos períodos de congelamento [RAMOS, 2014].

Estudos sobre a formação do gelo nos vazios do betão, elaborados por Corr et al em 2004, permitiram um avanço na perceção da ação do congelamento sobre o betão, ao observar a microestrutura dos poros, com a utilização de microscópio eletrónico de varrimento a baixas temperaturas. Na figura 16 pode-se comparar o mesmo poro preenchido com pequenos cristais de gelo e após a sublimação, compreendida pela passagem da água do estado sólido (gelo) para o gasoso [LIMA e LIBORIO, 2009].



(a) Vazio de ar com cristais de gelo.



(b) Vazio de ar após a sublimação do gelo

Figura 16 - Micrografias eletrônicas de varrimento obtidas em temperaturas criogênicas: (a) Poro preenchido parcialmente por cristais de gelo; (b) Poro após a sublimação dos cristais de gelo [LIMA e LIBORIO, 2009]

Quando o betão congela existem efeitos de deterioração afetos à fase em que se dá o congelamento. Se o betão congelar antes do endurecimento, o processo de hidratação do cimento será suspenso enquanto as temperaturas se mantiverem negativas. Após o início do degelo, o betão voltará a hidratar sem haver consequências graves para a obtenção das resistências mecânicas, apesar da expansão da água tender a aumentar o volume de poros. Em contrapartida, se o betão congelar posteriormente ao seu endurecimento, mas quando este ainda não adquiriu resistência suficiente, a expansão associada ao congelamento da água resultará numa perda irreparável de resistência [YAN, 2013].

Mehta e Monteiro em 2008, baseando-se no trabalho de Verbeck e Landgren em 1960, afirmaram que nos agregados com baixa permeabilidade e elevada resistência mecânica, a deformação causada pelo aumento de volume da água é suportada sem causar fissuras. A durabilidade do betão a ciclos gelo/degelo está também dependente da taxa de descida da temperatura e das características dos agregados, que condicionam a formação de poros e a sua distribuição [RAMOS, 2014].

3.4. EXPOSIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS

Quando o betão é exposto a temperaturas elevadas, os efeitos sobre os materiais e elementos que o compõem devem ser considerados. Os danos provocados no betão dependem não só das temperaturas atingidas, e do intervalo de tempo durante a qual é mantida, mas também das características do próprio betão, como o tipo e dosagem de cimento, a razão A/L (água/ligante), o tipo de agregados e a espessura de recobrimento [FERREIRA, 2000].

As propriedades mecânicas como a resistência à compressão, a resistência à tração por flexão, o módulo de elasticidade, e a quantidade de poros, são consideravelmente afetadas

durante a exposição a altas temperaturas que podem causar deficiências estruturais significativas e irreversíveis no betão. O efeito negativo das temperaturas elevadas no betão pode dar-se pela fusão da pasta cimentícia, que depende essencialmente da sua composição química e que, por se tratar do ligante entre os restantes componentes, é condicionante na integridade do betão. Vários estudos mostram que alterações macroestruturais sofridas pelo betão devido ao aumento da temperatura conduzem a perdas significativas de resistência e durabilidade, cujas consequências se traduzem em danos funcionais e estéticos nos edifícios [SANTOS E RODRIGUES, 2011]. O efeito combinado de agregados expansivos com a contração da pasta cimentícia, conduz à redução das resistências mecânicas do betão e, conseqüentemente, ao aparecimento de fendas. [FERREIRA, 2000]

O efeito da temperatura no betão prende-se, essencialmente, com a evaporação de água a partir dos 100°C [SILVA, 2013]. O aumento da temperatura provoca modificações na composição química e na estrutura física do betão, conduzindo à perda de resistência mecânica e ao aparecimento de microfissuras quando as temperaturas atingem os 300°C. O hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , um dos compostos mais importantes da pasta de cimento, tal como mencionado em 2.1., decompõe-se entre os 300°C e os 600°C, provocando expansões no betão. Acima dos 600°C o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), componente responsável pela resistência mecânica do cimento decompõe-se [PHAN, 2005; NISTIR 6210, 2008].

Na Tabela 2 são apresentadas as percentagens das resistências residuais (resistências mecânicas remanescente após exposição a temperaturas elevadas) aos 28 dias de idade relativamente à resistência inicial, para diferentes temperaturas atingidas [COSTA, 2012]:

Tabela 2 - Percentagem de resistências residuais de betão de cimento Portland normal relativamente à resistência aos 28 dias quando sujeito a várias temperaturas [COSTA, 2012]

Temperatura máxima (°C)	20	200	400	600	800
Resistências residuais (%)	100	50 - 92	45 - 83	38 - 69	20 - 36

Torna-se muito difícil quantificar o desempenho do betão sujeito a elevadas temperaturas, muito devido às diferenças no tipo de tensões, no teor de humidade no aquecimento, nas diferenças no tempo de exposição, nas temperaturas atingidas e na diferença dos constituintes do betão. Devido a estes fatores, verifica-se que existe uma grande dispersão nos valores da perda de resistência do betão em função da temperatura a que este esteve exposto, como se pode verificar na tabela 2 [FERREIRA, 2000].

Embora o betão apresente uma redução da sua capacidade estrutural, verificada através da diminuição das resistências quando exposto a temperaturas elevadas, o mesmo normalmente resiste à ação do calor, por um período de tempo considerável, sem colapsar. Quando a estrutura de poros é aberta, o vapor libertado pode escapar facilmente, resultando num alívio por parte das tensões geradas com o calor [LIMA ET AL 2004].

Misturas pobres em cimento sofrem menor perda de resistência que misturas ricas. Os betões constituídos por agregados de características leves exibem metade da perda da resistência à compressão comparativamente com os betões compostos por agregados de densidade corrente (finos e grossos), após exposição a temperaturas de 800°C, por apresentarem uma maior permeabilidade. A resistência à flexão é mais afetada do que a resistência à compressão quando o betão é sujeito a altas temperaturas, sendo que a perda destas resistências mecânicas é atenuada na presença de sílica [FERREIRA, 2000].

A baixa permeabilidade do betão de alta densidade faz com que o vapor gerado durante o aquecimento não encontre porosidade suficiente na matriz para atingir a superfície, ocorrendo a saturação dos poros existentes e elevando as pressões internas [LIMA ET AL 2004].

A resistência residual do betão pode ser avaliada de forma simplificada e aproximada, recorrendo à cor do mesmo depois de exposto a patamares de temperaturas elevadas. O betão exposto a temperaturas entre os 300°C e os 600°C apresenta uma cor avermelhada ou rosada, temperaturas até aos 900°C deixam o betão com uma cor cinzenta e ultrapassados os 900°C uma cor esbranquiçada ou amarelada [CIMENTOITAMBE, 2009].

4. CAMPANHA EXPERIMENTAL

4.1. MATERIAIS/PRODUÇÃO

4.1.1. CIMENTO

O ligante utilizado para produção do SIMCON-BCC foi o Cimento Portland CEM I 52,5R preconizado na NP EN 197-1 [IPQ, 2007a], caracterizado pela particularidade de atingir altas resistências a partir dos primeiros dias de aplicação. O cimento é produzido pela SECIL e, segundo a ficha técnica, a percentagem de clínquer presente neste tipo de cimento é igual ou superior a 95%, sendo a remanescente composta por constituintes minoritários, o que permite produzir betões de resistência elevada. A composição do cimento Portland CEM I 52,5R confere ao betão uma maior resistência mecânica inicial, alcançando valores de resistência característica à compressão na ordem dos 30MPa aos 2 dias de idade e de 52.5MPa aos 28 dias [IPQ, 2007a]. O cimento apresenta cor cinzenta, com elevado calor de hidratação. Adicionalmente, este tipo de cimento proporciona maior alcalinidade ao compósito cimentício e, conseqüentemente, uma maior contribuição para a passivação dos elementos metálicos, retardando os fenómenos de oxidação e carbonatação, por formar maior quantidade de Ca(OH)_2 para reagir com o CO_2 . Evitando a corrosão das fibras e armaduras são minimizados os efeitos negativos no betão, tais como o aparecimento de manchas, destacamentos e fissuras [SECIL, 2014].

A utilização do cimento CEM I 52,5R é recomendada para peças de betão em que a descofragem seja rápida e onde sejam exigidas resistências elevadas a curto prazo, tais como [CIMPOR, 2014]:

- Betão estrutural pré-fabricado (lajes, vigas e pilares);
- Componentes de betão (blocos, lajetas, manilhas);
- Elementos estruturais de secção otimizada (armado/pré-esforçado);
- Betão para pisos especiais;
- Argamassas especiais.

4.1.2. ADJUVANTE

Define-se por adjuvante um material adicionado durante a amassadura do betão, em quantidades que não excedam os 5% da massa de ligante, para modificar determinada propriedade do mesmo no estado fresco ou endurecido [FERREIRA, 2000].

No processo de amassadura, o cimento tem tendência a aglomerar, impedindo que a água esteja em contacto com todas as suas partículas, evitando que a hidratação seja uniforme e dificultando o processo de amassadura. Com isto, a mistura torna-se mais viscosa, com partículas de cimento anidro, dando origem a matrizes cimentícias com resistências mecânicas mais baixas e com tendência a abrir fissuras [PESSOA ET AL, 2001]. Os superplastificantes são adjuvantes químicos que adicionados às matrizes cimentícias atuam ao nível da dispersão das partículas. Ao minimizar a aglomeração e o número de partículas de cimento anidro, a viscosidade da pasta é também minimizada, melhorando desta forma a trabalhabilidade da mistura e aumentando os produtos de hidratação [DIAS, 2015].

O superplastificante utilizado para a produção de betão foi o Powerflow 2230 (MC-BAUCHEMIE Portugal Lda.). O adjuvante utilizado provoca dispersão intensa na pasta cimentícia, proporcionando uma boa homogeneidade e uma melhoria ao nível do espalhamento e da sua compactação. A ficha técnica do PowerFlow 2230 indica que se trata de um superplastificante à base de policarboxilatos e livre de agentes promotores de corrosão. A sua utilização permite a produção de betão com uma quantidade reduzida de água. As propriedades requeridas do betão fresco são atingidas com dosagens moderadas deste adjuvante. O PowerFlow 2230 deve ser adicionado durante a mistura do betão, sendo esta mais eficaz após a primeira adição de água na amassadura. Necessita de um tempo de mistura relativamente curto para desenvolver o seu efeito plastificante, o que fornece à mistura de betão uma produção relativamente rápida. Mantendo-se o efeito de plastificação durante bastante tempo, proporciona-se uma melhoria na trabalhabilidade do betão. A boa compatibilidade com agentes introdutores de ar é característica do PowerFlow 2230, bem como a adesividade mínima que este apresenta, compreendida pela intensidade de fixação a superfícies, como é o caso das cofragens ou moldes utilizadas na betonagem. A combinação especial de agentes ativos permite a produção de betão homogéneo de todas as classes de consistência [MC-BAUCHEMIE, 2009].

Em suma, o PowerFlow 2230 fornece ao betão uma combinação de boa trabalhabilidade com uma reduzida necessidade de compactação. A tabela 3 apresenta os dados e recomendações a ter em conta sobre a utilização do superplastificante [MC-BAUCHEMIE, 2009].

Tabela 3 - Dados técnicos do superplastificante PowerFlow 2230 [MC-BAUCHEMIE, 2009]

Características	Unidades	Valores	Comentários
Densidade	kg/dm ³	Aprox. 1,03	
Dosagem recomendada	g	2 – 50	Por kg de cimento
Teor máximo de cloretos	% por peso	<0,10	
Teor máximo de álcalis	% por peso	<2,00	

4.1.3. LÃ DE AÇO

O objetivo da utilização de lã de aço como reforço de betão foi o de reduzir os custos associados ao fabrico e produção do SIMCON-BCC. Lã de aço é o nome que designa filamentos de metal finos e agrupados que formam uma manta, conforme figura 17, a olho nu, em que as fibras que compõem a lã de aço diferem quer em termos de secção, quer em comprimento. Neste trabalho foi utilizada uma lã de aço comercial, fornecida pela Drogomóvel com o nome de palha-de-aço nº3. A lã de aço é um material constituído por um conjunto de fibras de aço muito finas e entrelaçadas. Usualmente utilizada em trabalhos de acabamento e polimento de objetos de alumínio ou metal, bem como na limpeza de elementos metálicos. A lã de aço apresenta diversos graus de aspereza e a sua espessura varia de acordo com o grau de ajuste das lâminas de corte do aço no processo de fabrico.



Figura 17 – Porção de lã de aço

Um dos processos possíveis de produção da lã de aço inicia-se com um varão metálico que é puxando através de orifícios de uma matriz metálica, que reduz o varão a filamentos de espessura reduzida, processo conhecido como trefilagem [FERREIRA, 2015]. Os filamentos de aço são dispostos paralelamente, em bobines, que seguem para o equipamento de corte, onde são cortados por lâminas que diminuem a sua secção de forma a criar fios cada vez mais delgados, variando a espessura das fibras de acordo com o nível de ajuste das lâminas de corte utilizadas [DIAS, 2015].

Através da observação num microscópio ótico foi possível visualizar, a uma escala de 500µm, que a lã de aço apresenta filamentos com diferentes geometrias, nomeadamente em termos de secção transversal e longitudinal (Figura 18). Considera-se que estas propriedades favorecem o desempenho aquando da ligação no betão, fortalecendo as ITZ (zonas de interface), por ação mecânica resultante de forças de atrito.

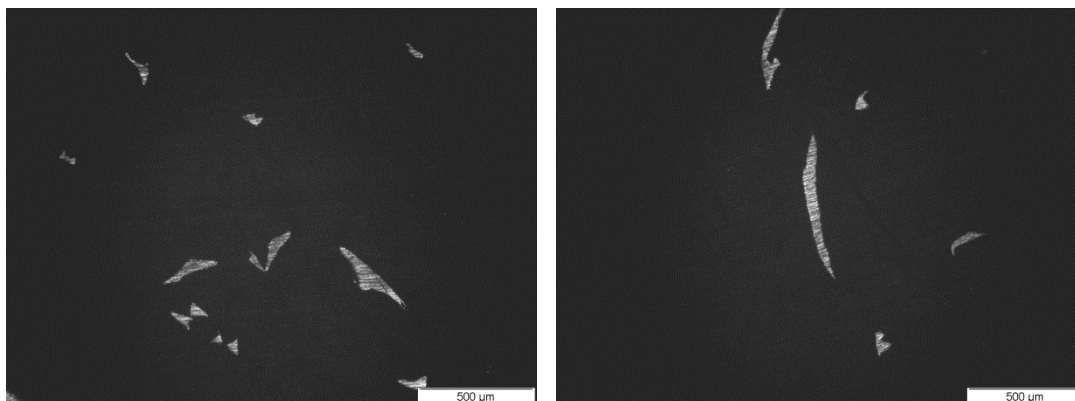


Figura 18 – Imagens das secções da lã de aço através de microscópio ótico [MlcroLab, IST]

Verificou-se também, através do microscópio ótico, que a superfície exterior das fibras que compõem a lã de aço é bastante irregular e porosa (figura 19), favorecendo, à semelhança do observado nas secções (figura 18), a ligação aos restantes constituintes do betão durante a hidratação do mesmo [DIAS, 2015].

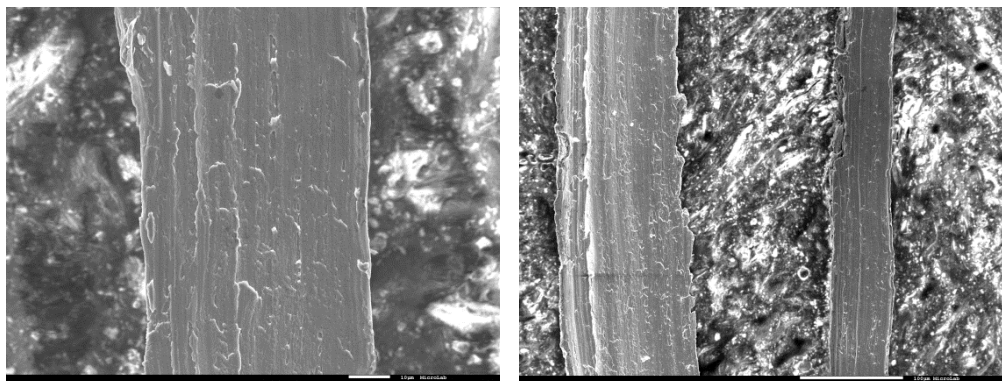


Figura 19 - Imagens da lã de aço através de Microscópio ótico [MlcroLab, IST]

Para uma análise da composição química da lã de aço utilizada neste trabalho recorreu-se ao equipamento acoplado ao microscópio eletrónico (OXFORD INSTRUMENTS - Inca pentaFETx3) que efetua uma leitura dos constituintes químicos. A figura 20 apresenta o gráfico de microanálise EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*), onde a análise elementar demonstra uma forte presença de ferro (Fe), sendo o seu constituinte maioritário. Produzidas a partir de aço de muito baixo teor de carbono (C). A composição da lã apresenta um teor de 5% de oxigénio (O), o que demonstra que esta já se encontra parcialmente oxidada. Na figura 20, a zona entre os 2 e os 5 eV não é esclarecedora quanto à identificação dos elementos químicos presentes, onde normalmente este tipo de aço apresenta percentagens de 0,5% de manganésio (Mn) e sílica (Si). Na zona dos 10 eV costuma verificar-se a presença de cobre (Cu).

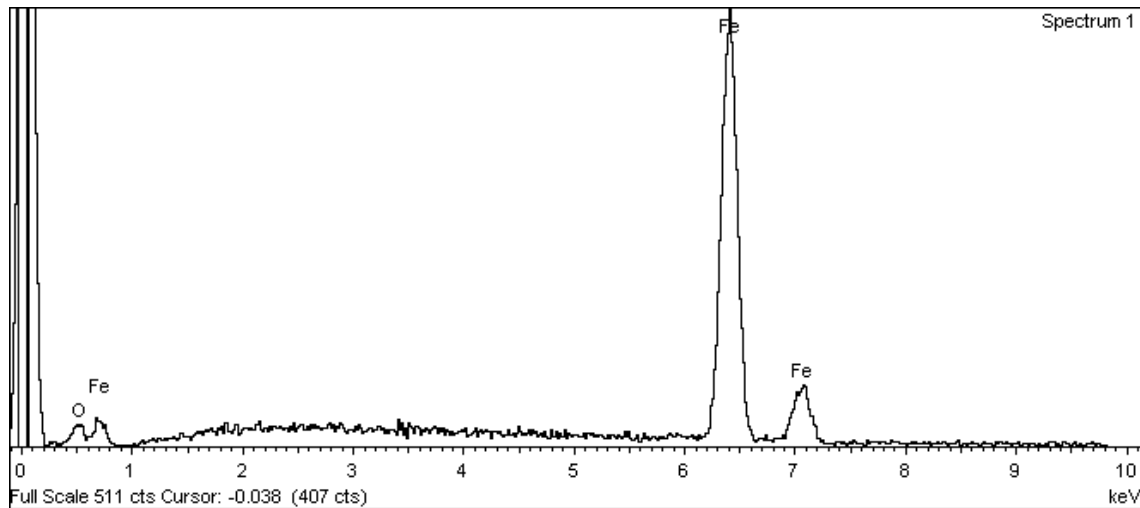


Figura 20 - Gráfico EDS (representativo dos constituintes químicos da lã de aço) [MicroLab, IST]

De forma a determinar a resistência à tração das fibras foi efetuado um ensaio de microdureza com recurso ao equipamento Struers - Duramin 2. O ensaio consiste em efetuar pressão sobre uma fibra individual, com força e duração conhecida, tendo-se obtido uma tensão de cedência de 95MPa, muito acima da capacidade do betão e, que a ser utilizada como reforço, a lã aumenta de uma forma acentuada a resistência à tração por flexão da matriz cimentícia.

A lã de aço apresenta uma massa volúmica específica de 6300kg/m³ e comprimento de embebimento suficiente para prevenir a rotura ao nível da ligação fibra/matriz [DIAS, 2015].

4.1.4. COMPOSIÇÃO E PRODUÇÃO

A composição alvo de estudo tem como finalidade a produção e caracterização de um *slurry infiltrated mat concrete* produzido com lã de aço de baixo custo (SIMCON-BCC). Numa primeira fase, foram efetuadas misturas de calda de cimento com recurso a adjuvante superplastificante. A definição da composição da matriz cimentícia teve como base o trabalho realizado por Dias em 2015, Ferreira em 2015 e Almeida et al em 2012, entre outros autores, tendo-se testado várias formulações, no que diz respeito à dosagem de ligante, de água e de tipo e dosagem de adjuvante. Este trabalho preliminar teve como objetivo otimizar o desempenho da mistura no estado fresco, sem descuidar o desempenho esperado no estado endurecido.

A adequação da composição, e consequente desempenho no estado fresco, foi aferida pelo ensaio de espalhamento, determinante na avaliação da aptidão da calda de cimento para impregnação da lã de aço. O objetivo foi otimizar o desempenho da mistura no estado fresco, entenda-se garantir as condições adequadas de trabalhabilidade que permitam a correta impregnação da lã de aço, sem que se verifique fenómenos de exsudação (migração de água para a superfície do betão) e/ou segregação (separação de constituintes sólidos) [DIAS, 2015].

Determinada a composição da matriz cimentícia, foram produzidos provetes de SIMCON-BCC com as dimensões 40x40x160mm.

Foram produzidos 72 provetes de ensaio através da realização de 7 amassaduras. Apesar de não terem sido produzidas no mesmo dia, todas as misturas produzidas apresentaram a mesma formulação e foram produzidas com iguais procedimentos de amassadura.

A composição da matriz cimentícia é a que se apresenta na tabela 4.

Tabela 4 - Dosagem de constituintes para produção de 1 m³ de calda de cimento

Constituinte	kg/m³ de betão
Cimento [C]	1000
Água [A]	300
Adjuvante [H]	10 (0,01xC)

O procedimento de produção da calda de cimento adotado é o apresentado na tabela 5.

Tabela 5 - Procedimento de amassadura

Tempo	Atividade
0 min	Introdução do Cimento [C] + 80% da Água [A]
1 min	Amassadura com recurso a torna
2 min	Introdução do Adjuvante [H]
4 min	Introdução dos restantes 20% de [A], com lavagem do recipiente do Adjuvante [H] com a amassadura em curso
6 min	Repouso e aferição da eficácia da mistura
8 min	Amassadura
10 min	Finalização

A colocação da lã de aço (10% da massa de cimento) no molde precedeu a produção da amassadura (figura 21).



Figura 21 – Colocação da lã de aço nos moldes

Para a moldagem dos provetes foi aplicado, primeiramente, um óleo descofrante (Madock 129/7, MC-BAUCHEMIE Portugal Lda.) em todas as faces do molde metálico em contacto com a matriz cimentícia. Colocou-se o dispositivo auxiliar de infiltração, composto por uma superfície plana com orifícios, sobre o molde metálico por forma a garantir que a lã de aço se mantivesse em posição (Figura 22). Este dispositivo é vazado para que possa ocorrer a moldagem através dele. Foi ainda adicionado a este dispositivo um funil de forma a encaminhar a pasta cimentícia para o interior do molde (Figura 22). Após a moldagem, deu-se início à compactação, através de vibração externa, utilizando-se uma mesa vibratória elétrica de 100W (TECNOTEST - AT 223/H) que produz 3000 vibrações por minuto. A compactação ocorreu durante 1 minuto e 30 segundos.

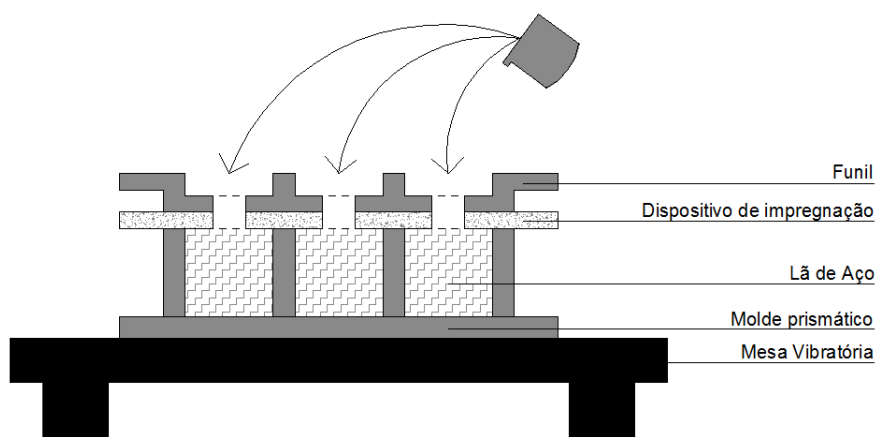


Figura 22 - Esquema do preenchimento dos moldes

A descofragem dos moldes foi feita 24 horas após a sua moldagem. Seguidamente, os provetes foram encaminhados e acondicionados para o processo de cura destinado, conforme o ambiente de estudo.

4.2. PLANO DE ENSAIOS

De forma a caracterizar e aferir as propriedades do SIMCON-BCC produzido foram realizados ensaios no estado fresco, aplicadas condicionantes de exposição e cura e realizados ensaios no estado endurecido. Na tabela 6 estão discriminadas as normas utilizadas para a caracterização dos provetes através dos ensaios preconizados no estado fresco e endurecido e os procedimentos de cura adotados.

Tabela 6 - Resumo dos procedimentos realizados e respectivas normas utilizadas

	ENSAIO/AMBIENTE	DOCUMENTO BIBLIOGRÁFICO	EXECUÇÃO/MOMENTO DE ENSAIO
ESTADO FRESCO	Consistência por espalhamento	EN 1015-3:1999	Após amassadura
	Massa Volúmica no Estado Fresco	EN 1015-6:1998	Após amassadura
CONDIÇÕES ESPECIAIS	Condições de Cura de Referência	NP EN 12390-2:2009	Após desmoldagem
	Condições Ambientais Correntes	Não aplicável	Após desmoldagem
	Ambiente Marítimo Submerso	Não aplicável	Após desmoldagem
	Gelo/Degelo	Adaptado de RILEM TC 117 FDC	Após condições de cura de referência
	Altas Temperaturas	Adaptado de ISO 834-10	Após condições de cura de referência
ESTADO ENDURECIDO	Massa Volúmica Aparente	NP EN 12390-7:2009	28 dias
	Massas Volúmicas e Porosidades	LNEC E394	28 dias
	Absorção de água por capilaridade	LNEC E393	28 dias
	Resistência à Flexão	NP EN 12390-5:2009	28 dias
	Resistência à Compressão	NP EN 12390-3:2009	28 dias
	Velocidade de Propagação de Ultrassons (Módulo de Elasticidade Dinâmico)	NP EN 12504-4:2007	28 dias

A caracterização da durabilidade do SIMCON-BCC foi feita com recurso a 6 grupos de provetes, sujeitos a diferentes condições de cura e/ou ambiente agressivo, a saber:

- Betão simples, sem reforço, por forma a avaliar o desempenho da matriz (0%);
- SIMCON-BCC sujeito a condições de cura padrão (Ref);
- SIMCON-BCC sujeito a cura efetuada em condições ambientais correntes (CA);
- SIMCON-BCC sujeito a cura efetuada em ambiente marítimo submerso (AM);
- SIMCON-BCC sujeito a cura padrão e exposição a ciclos de gelo/degelo (GD);
- SIMCON-BCC sujeito a cura padrão e exposição a altas temperaturas (AT).

Para efeitos de caracterização, e de forma a obter-se uma amostra representativa, foram produzidos 12 provetes para cada um das situações em estudo, o que perfaz um total de 72 provetes produzidos.

Após a cura designada, os provetes produzidos e curados para cada um dos ambientes em estudo, foram sujeitos aos ensaios do estado endurecido preconizados neste trabalho (Figura 23).

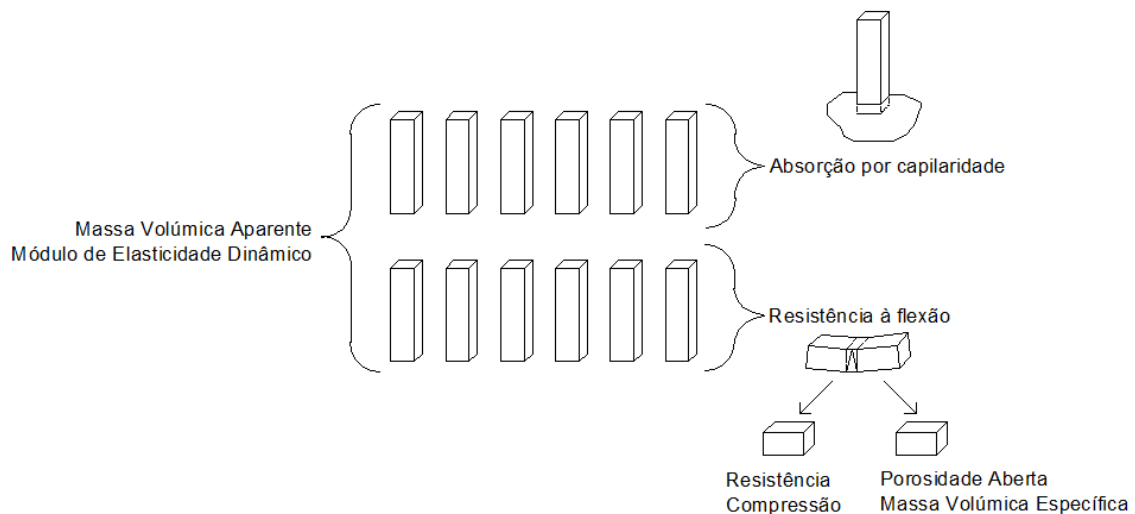


Figura 23 - Utilização racionalizada dos provetes, relativamente aos ensaios realizados no estado endurecido

4.3. CARACTERIZAÇÃO DO SIMCON-BCC NO ESTADO FRESCO

4.3.1. DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO

A determinação da consistência da pasta cimentícia no estado fresco tem como base a norma EN 1015-3:1999 [CEN, 1999], e foi efetuada imediatamente após sua produção.

A consistência é medida através da fluidez da pasta cimentícia colocada num molde metálico posteriormente removido. Recorrendo-se a uma mesa de espalhamento são efetuadas 15 pancadas de forma a induzir um impulso na pasta, facilitando o seu espalhamento. Por se tratar de uma calda de cimento com alguma fluidez foi efetuada uma adaptação à norma EN 1015-3:1999 [CEN, 1999], onde se anulou a utilização da mesa de espalhamento e, por conseguinte, a aplicação de movimento através da mesma.

Posto isto, a pasta foi acondicionada no molde referido na norma, com morfologia troncocónica (figura 24), com diâmetro inferior de 100 mm, a estreitar para um diâmetro superior de 70 mm ao longo de 60 mm de altura. Vereteu-se a calda de cimento para o molde num fluxo corrente efetuando um enchimento uniforme, sem recurso a compactação por se tratar de uma calda fluida.

De seguida, e após se limpar o excedente de pasta acima da face superior do molde, procedeu-se à sua remoção. Num movimento vertical, efetuado de forma lenta e contínua, o molde foi removido, fazendo fluir livremente a pasta cimentícia sobre a superfície plana (Figura 25) com marcações auxiliares à medição do espalhamento, deixando-se repousar até que atinja um espalhamento constante. Após este processo, registou-se a máxima dimensão do espalhamento segundo duas direções perpendiculares entre si, com aproximação às unidades.

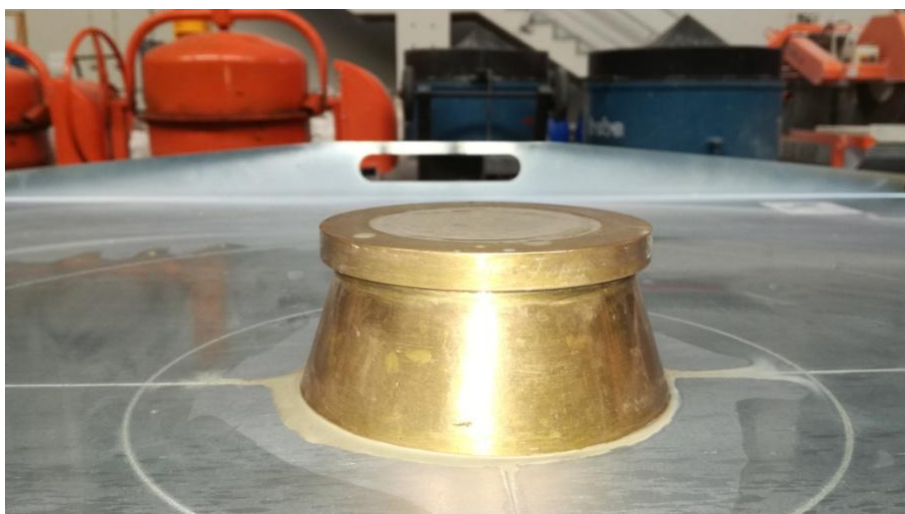


Figura 24 - Molde troncocónico [Laboratório de Engenharia Civil, ESTBarreiro/IPS]

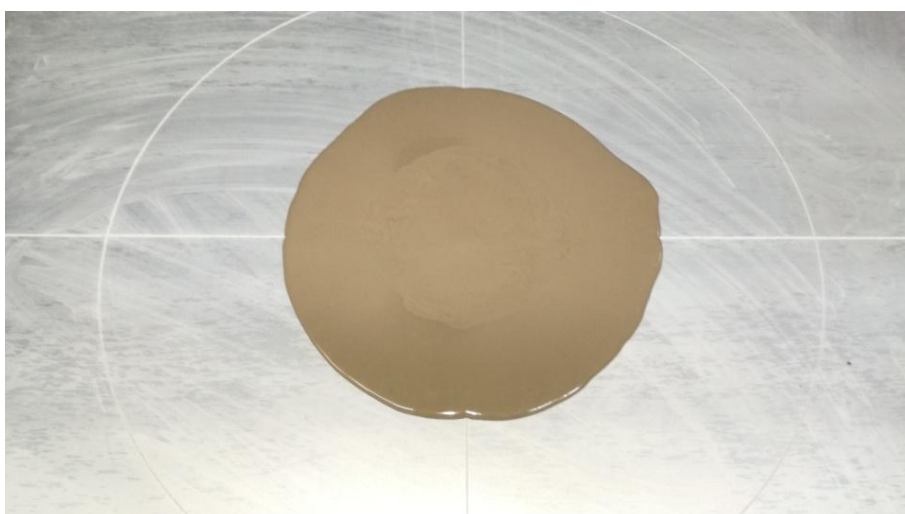


Figura 25 - Pasta cimentícia após remoção do molde e em fase de espalhamento [Laboratório de Engenharia Civil, ESTBarreiro/IPS]

4.3.2. DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA NO ESTADO FRESCO

A determinação da massa volúmica da pasta cimentícia no estado fresco foi efetuada com base na norma EN 1015-6:1998 [CEN, 1998]. O método consiste na compactação da pasta cimentícia num recipiente rígido e estanque, de massa e volume conhecidos. O conjunto (recipiente + pasta) é pesado numa balança com exatidão de 0,1g (Kern 572 - Figura 26).

Devido à fluidez da pasta cimentícia (4.3.1.) ter sido superior a 200mm e não ter apresentado agregado grosso (4.1.4.), optou-se pelo procedimento de enchimento do recipiente sem recurso a compactação, tal como referido na norma EN 1015-6:1998 [CEN, 1998], vertendo-se a pasta cimentícia no centro da face aberta do recipiente, de forma a evitar a segregação no contacto da massa com as bordas do recipiente.



Figura 26 - Pesagem da mistura no estado fresco [Laboratório de Engenharia Civil, ESTBarreiro/IPS]

O cálculo da massa volúmica aparente no estado fresco (kg/m^3) foi efetuado a partir da equação 1, aproximada aos 10kg/m^3 :

$$M.V. \text{ Est. Fresco} = \frac{m_2 - m_1}{V_{\text{recip}}} \quad (\text{Equação 1})$$

em que :

m_1 - massa do recipiente vazio [kg];

m_2 - massa do recipiente cheio de pasta cimentícia [kg];

V_{recip} - volume do recipiente [L].

4.4. CARACTERIZAÇÃO DO SIMCON-BCC NO ESTADO ENDURECIDO

4.4.1. MASSA VOLÚMICA APARENTE

A determinação da massa volúmica do betão no estado endurecido foi efetuada com base na norma NP EN 12390-7:2009 [IPQ, 2009 d]. O método consistiu na secagem dos provetes de volume conhecido (Figura 27) numa estufa ventilada a $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas, até massa constante. Registou-se o valor da massa do provete seco com recurso de uma balança, com precisão de 0,1g (KERN 572-45).

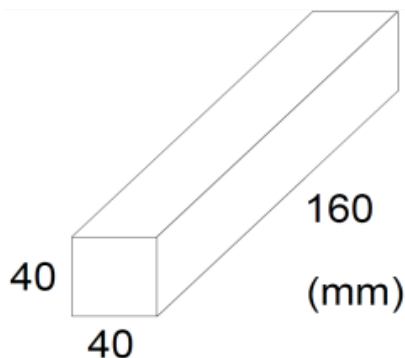


Figura 27 - Configuração e dimensão dos provetes

O cálculo da massa volúmica aparente do betão endurecido (kg/m^3) foi efetuado a partir da equação 2, aproximada aos 10kg/m^3 :

$$M.V. Ap = \frac{m_{seco}}{V_{prov}} \quad (\text{Equação 2})$$

em que:

m_{seco} - massa do provete seco [kg];

V_{prov} - Volume dos provetes = $40 \times 40 \times 160 \text{ mm} = 256000 \text{ mm}^3 = 0,000256 \text{ m}^3$.

4.4.2. DETERMINAÇÃO DAS MASSAS VOLÚMICAS E POROSIDADES

O ensaio de determinação das massas volúmicas e porosidades foi realizado após a cura de 28 dias dos provetes. Utilizou-se uma das metades sobranes dos provetes que advieram do ensaio da resistência à flexão, tal como apresentado na figura 23 no Capítulo 4.2. e recorreu-se ao procedimento descrito na especificação LNEC E394 [LNEC, 1993b].

O ensaio iniciou-se com a pesagem dos provetes secos (m_{seco}) com recurso a uma balança com precisão de 0,001g (KERN EG 620-3NM – Figura 28).



Figura 28 - Pesagem de provetes [Laboratório de Engenharia Civil, ESTBarreiro/IPS]

O passo seguinte passou pela colocação dos provetes num exsicador vedado (Figura 29), ligado a uma bomba de vácuo (ILMVAC GmbH), durante um período de 24 horas, com a finalidade de retirar o ar que ocupava os poros no interior do betão (Figura 30). Em seguida fechou-se a válvula 3 da figura 30, introduziu-se água dentro do exsicador, com a bomba de vácuo fechada, através da tampa do exsicador, que se encontrava ligada a um reservatório de água, abrindo-se a válvula 1, permitindo que os provetes se mantivessem sob vácuo durante o processo de imersão dos mesmos. O caudal de enchimento deve ser tal, que os provetes fiquem completamente imersos, em não menos de 15 minutos. De seguida voltou-se a fechar a válvula 1 e abriu-se a válvula 3 da figura 30, colocou-se a bomba novamente em funcionamento e mantiveram-se os provetes imersos no exsicador sob vácuo durante mais 24 horas, ao fim das quais se desligou a bomba de vácuo e se restabeleceu a pressão atmosférica (100kPa), deixando os provetes imersos em água durante mais 24 horas.

O procedimento utilizado permitiu que a água penetrasse nos poros acessíveis, através da ação das forças que se criaram quando se restabeleceu a pressão atmosférica após vácuo sobre os provetes, ainda totalmente imersos em água.

Após 72 horas desde o início do procedimento do ensaio, os provetes foram retirados do exsicador e procedeu-se à obtenção da sua massa quando imerso em água (mimers), através do método de pesagem hidrostática, com recurso a uma balança própria para o efeito, seguindo-se a obtenção da sua massa após limpeza superficial dos provetes, estando estes ainda saturados (msat).

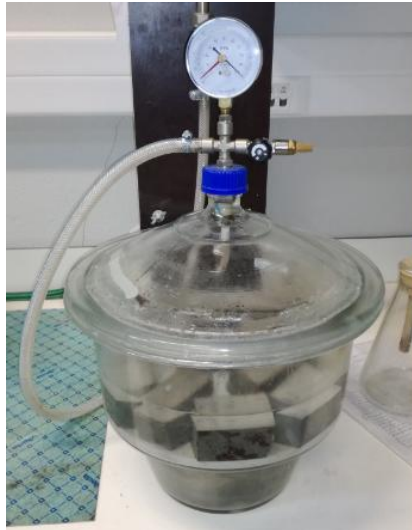


Figura 29 - Recipiente equipado com medidor de pressão [Laboratório de Engenharia Civil, ESTBarreiro/IPS]

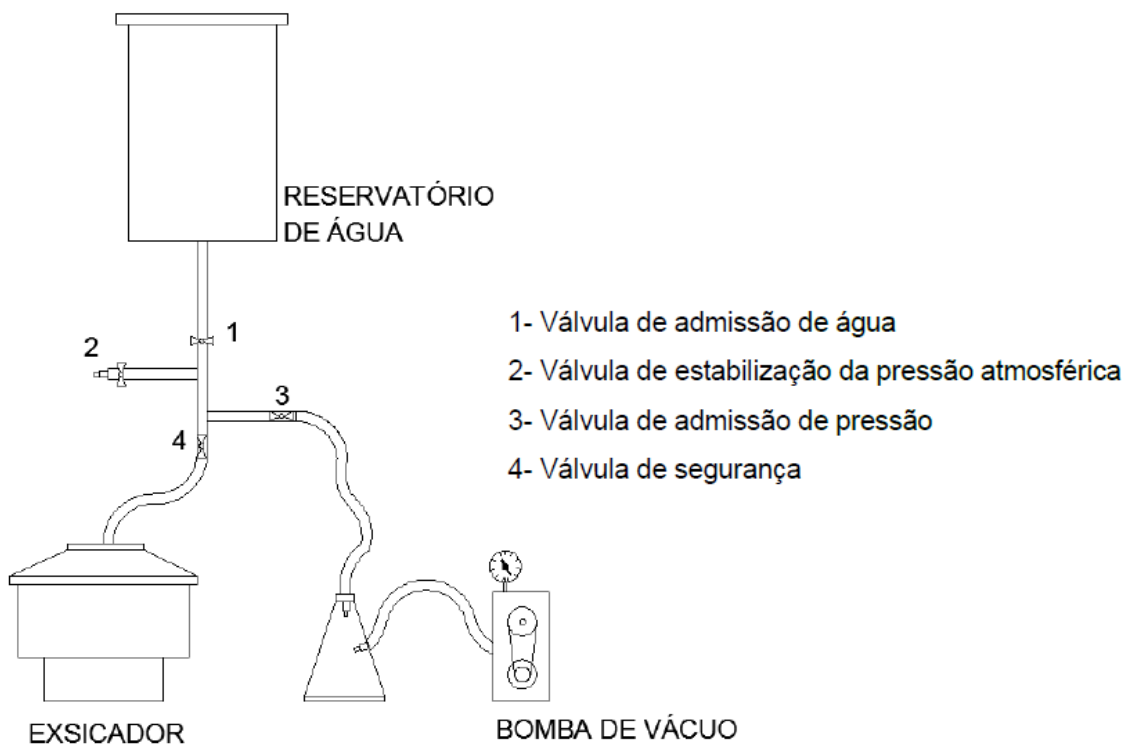


Figura 30 - Esquema descritivo do equipamento de ensaio [Adaptado de DIAS, 2015]

O volume de poros abertos (em mililitros) foi dado pela equação 3:

$$V. P. Ab = \frac{m_{sat} - m_{seco}}{\rho_{rh}} \times 1000 \quad (\text{Equação 3})$$

em que:

m_{sat} - massa do provete saturado [kg];

m_{seco} - massa do provete seco [kg];

ρ_{rh} - massa volúmica da água a 20°C [998 kg/m³].

O volume aparente (em mililitros) foi dado pela equação 4:

$$V. Ap = \frac{m_{sat} - m_{imers}}{\rho_{rh}} \times 1000 \quad (\text{Equação 4})$$

em que:

m_{sat} - massa do provete saturado [kg];

m_{imers} - massa do provete imerso em água [kg];

ρ_{rh} - massa volúmica da água [20°C] = 998kg/m³.

A massa volúmica aparente (em kg/m³) é a razão entre a massa do provete seco e o seu volume aparente e foi calculada através da equação 5:

$$M. V. Ap = \frac{m_{seco}}{m_{sat} - m_{imers}} \times \rho_{rh} \quad (\text{Equação 5})$$

em que:

m_{seco} - massa do provete seco [kg];

m_{sat} - massa do provete saturado [kg];

m_{imers} - massa do provete imerso em água [kg];

ρ_{rh} - massa volúmica da água a 20°C [998 kg/m³].

A massa volúmica real (em kg/m³) é a razão entre a massa e o volume sólido do provete quando seco e foi calculada através da equação 6:

$$M. V. Real = \frac{m_{seco}}{m_{seco} - m_{imers}} \times \rho_{rh} \quad (\text{Equação 6})$$

em que:

m_{seco} - massa do provete seco [kg];

m_{imers} - massa do provete imerso em água [kg];

ρ_{rh} - massa volúmica da água a 20°C [998 kg/m³].

A porosidade aberta (%) é a razão entre o volume dos poros abertos e o volume aparente do provete e foi calculada através da equação 7:

$$Pa = \frac{m_{sat} - m_{seco}}{m_{sat} - m_{imers}} \times 100 \quad (\text{Equação 7})$$

em que:

m_{sat} - massa do provete saturado [kg];

m_{seco} - massa do provete seco [kg];

m_{imers} - massa do provete imerso em água [kg];

A porosidade total (%) é a relação entre o volume total de poros em relação ao volume sólido do provete e foi calculada através da equação 8:

$$Pt = \frac{1 - M.V.Ap}{M.V.Real} \times 100 \quad (\text{Equação 8})$$

em que:

M. V. Ap - massa volúmica aparente [kg/m³];

M. V. Real - massa volúmica real [kg/m³].

A absorção de água (%), que considera a quantidade de água absorvida em relação à massa do provete quando seco, foi calculada através da equação 9:

$$\text{Abs. Água} = \frac{m_{\text{sat}} - m_{\text{seco}}}{m_{\text{seco}}} \times 100 \quad (\text{Equação 9})$$

em que:

m_{sat} - massa do provete saturado [kg];

m_{seco} - massa do provete seco [kg];

4.4.3. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O ensaio de absorção de água por capilaridade tem como finalidade perceber a tendência do betão para absorver água, através do contacto direto ou pela presença da mesma na atmosfera. Sendo o meio mais frequente para indução de agentes agressivos, o betão é severamente afetado pela presença de água no seu interior, absorvida através do mecanismo de absorção por capilaridade.

O coeficiente de absorção de água devido à ação capilar é medido utilizando provetes de betão endurecido, que após se encontrarem completamente secos e apresentarem massa constante, são imersos em 5 mm de água. Este ensaio é efetuado por um período específico de tempo, onde é monitorizada a absorção de água através da variação de massa dos provetes ao longo do tempo.

Para a realização do ensaio de absorção de água por capilaridade foram utilizados metades dos provetes da produção total, perfazendo 6 provetes por cada ambiente em estudo, como apresentado na figura 23, no Capítulo 4.2., tendo-se recorrido à especificação E393 do LNEC [LNEC, 1993a].

Para se dar início ao ensaio, os provetes têm de estar completamente secos e apresentar massa constante, para tal, foram mantidos em estufa a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 24 horas. De seguida os provetes são colocados num ambiente controlado, de forma a manter a humidade relativa (HR) constante e evitar a evaporação da água dos provetes ao longo do ensaio. Para tal utilizou-se uma caixa plástica hermeticamente vedada, tal como demonstrado na figura 31.

A caixa contém no seu interior um apoio de fundo, preenchida com água até 1/4 da sua altura. Sobre o apoio foi colocado um tabuleiro, forrado com manta geotêxtil, de forma a criar uma película absorvente. No fundo do tabuleiro, sobre a manta geotêxtil, colocaram-se apoios plásticos com secção transversal triangular de forma a minimizar a área de contacto com os provetes evitando que estes estejam em contacto direto com o tabuleiro. Seguidamente foi preenchido o fundo do tabuleiro com água, até uma altura de 5 mm acima da face inferior dos provetes [DIAS, 2015].

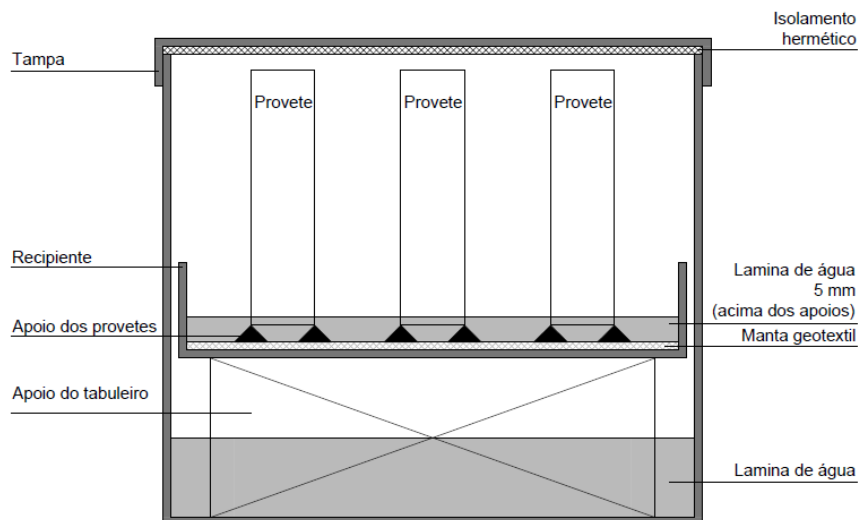


Figura 31 - Esquema do recipiente utilizado para o ensaio de absorção de água por capilaridade

O registo das massas dos provetes iniciou-se com estes ainda secos, no minuto zero do ensaio, imediatamente antes da sua imersão parcial. As medições de massa foram efetuadas com recurso a uma balança com precisão de 0,001g (KERN EG 620-3NM – Figura 32).



Figura 32 - Pesagem de provetes [Laboratório de Engenharia Civil, ESTBarreiro/IPS]

Após estarem em contacto com a água (Figura 33), dá-se início ao processo de monitorização da massa dos provetes, sendo efetuadas medições da massa dos mesmos após 5, 10, 15, 30, 60, 120, 180, 300, 360 minutos e continuamente de 24 em 24 horas decorridas desde o início do ensaio. Deu-se por concluído o ensaio quando o incremento de massa entre pesagens consecutivas não excedeu os 1%.

Ao longo do ensaio foi necessário garantir que o nível de água se mantinha constante, tendo sido efetuadas medições recorrentes através de um régua e sendo introduzida a quantidade de água necessária a qualquer instante de forma a garantir a mesma altura da lâmina de água (5mm acima da face inferior dos provetes).



Figura 33 – Ensaio de absorção por capilaridade

A quantidade de água absorvida por unidade de área em contacto com a água (kg/m^2) é dada através da equação 10:

$$m = \frac{m_{ti} - m_{t0}}{s} \quad (\text{Equação 10})$$

em que:

m_{t0} - massa do provete seco, no início do ensaio [kg];

m_{ti} - massa do provete decorrido determinado tempo t_i [kg];

s - secção do provete que se encontra em contacto com a água (40x40mm) [m^2].

Após se obter a quantidade de água absorvida através da variação da massa do provete ao longo do tempo, fez-se a representação gráfica da absorção de água por capilaridade, através do traçado da curva de absorção capilar. O gráfico expressa a quantidade de água absorvida, por unidade de área da secção do provete em contacto com a água, em função da raiz quadrada do tempo de ensaio decorrido, em minutos. O balizamento temporal utilizado no gráfico diz respeito, e tem maior significado nos primeiros 60 minutos de ensaio, quando se dá a absorção de água por capilaridade mais rápida. O coeficiente de capilaridade (CC), valor que quantifica a velocidade de absorção de água, é dado pelo(s) declive(s) do(s) troço(s) linear(es) reto(s) da curva de absorção capilar, correspondente à

velocidade de absorção de água, expressa em $\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$. O valor assintótico da absorção de água, quantifica a quantidade de água que o material consegue absorver por capilaridade.

4.4.4. RESISTÊNCIA À FLEXÃO

O ensaio de resistência à flexão foi efetuado após cura dos provetes 28 dias de idade. Foram utilizados metade dos provetes produzidos por cada mistura, tal como apresentado na figura 23, no Capítulo 4.2., e efetuou-se o procedimento descrito na norma NP EN 12390-5:2009 [IPQ, 2009c].

O equipamento utilizado para a realização do ensaio foi a prensa de flexão/compressão com uma célula de carga para flexão de 15kN (Cyber-Tronic – Figura 34). Foi necessária a introdução de alguns dados informativos no *software* do equipamento, designadamente as dimensões do provete (40x40x160mm), a distância entre apoios inferiores (100mm) e a velocidade de aplicação de carga através do apoio superior a meio vão (0,12MPa/s), antes de dar início ao ensaio propriamente dito. Em seguida, colocou-se o provete entre os apoios do equipamento (Figura 34) e deu-se início ao procedimento de ensaio, que aplica uma carga a meio vão e que vai aumentando a intensidade a uma velocidade constante até que se dê a rotura do provete.

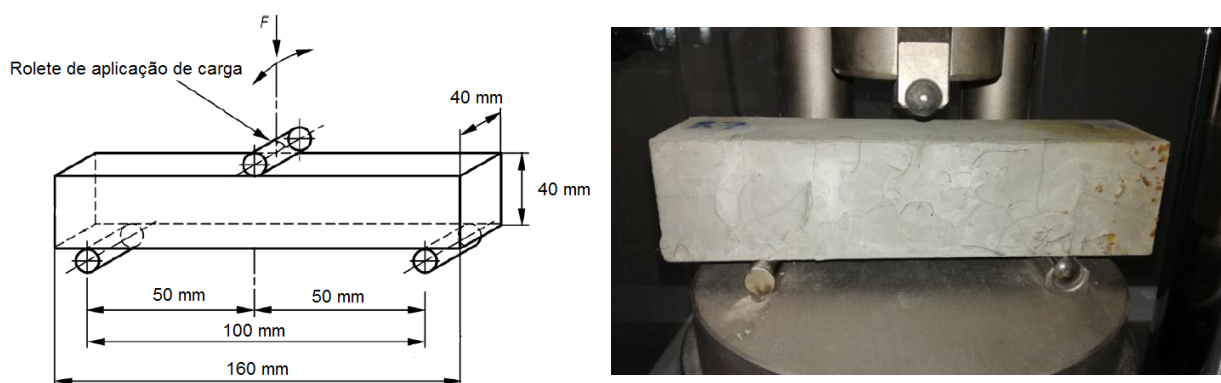


Figura 34 - Dispositivo de aplicação da carga nos provetes (carga a meio vão) [IPQ, 2009]; [Laboratório de Engenharia Civil, ESTBarreiro/IPS]

Após se dar a rotura do provete, registou-se a resistência à flexão (R_t), diretamente do monitor do equipamento, em MPa.

4.4.5. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio de resistência à compressão foi efetuado após cura dos provetes aos 28 dias de idade, tendo-se utilizado para tal uma das metades remanescente do ensaio de resistência à flexão, como apresentado na figura 23, no Capítulo 4.2.. Recorreu-se ao procedimento de ensaio descrito na norma NP EN 12390-3:2009 [IPQ, 2009d] para efetuar o ensaio.

Para a realização do ensaio utilizou-se o equipamento (Cyber-Tronic – Figura 35) constituído por uma prensa de flexão/compressão ligada a uma célula de carga para compressão de 250kN. De forma a se dar início ao processo de aplicação de carga foi necessária a introdução de dados no *software* informático do equipamento, nomeadamente as dimensões da área de contacto entre o provete e o prato inferior (40x40mm) e a velocidade de aplicação de carga, através do prato superior (1,5MPa/s). Em seguida o provete foi colocado entre os pratos do equipamento e centrado com o prato inferior, conforme figura 35. Deu-se início à aplicação da carga que aumentou de intensidade a uma velocidade constante sobre o prato superior, até que se deu a rotura do provete.

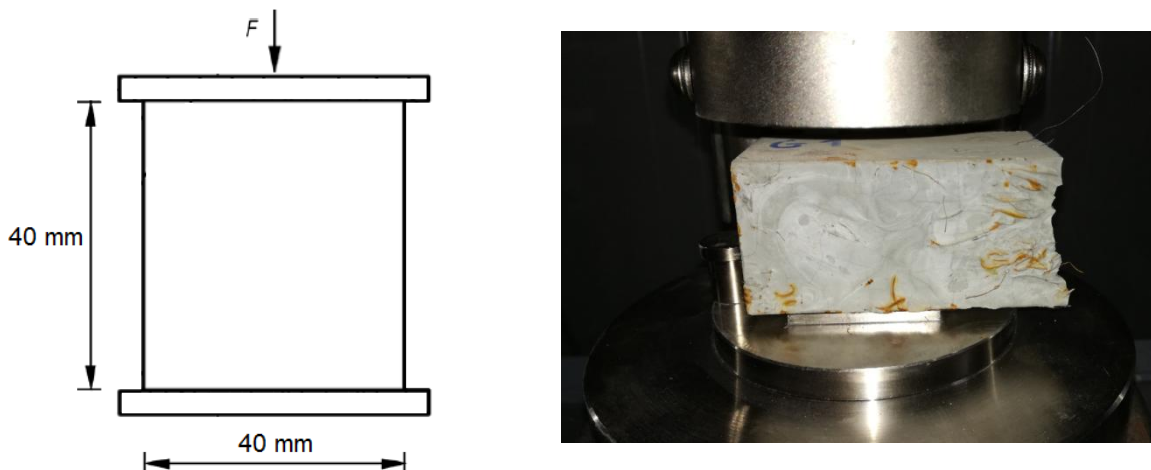


Figura 35 - Dispositivo de aplicação da carga nos provetes [IPQ, 2009]; [Laboratório de Engenharia Civil, ESTBarreiro/IPS]

Após ter ocorrido a rotura do provete, registou-se a resistência à compressão (R_c), fornecido através do monitor do equipamento, em MPa.

4.4.6. DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASSONS E MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

O ensaio o módulo de elasticidade dinâmica (M.E.D.), ou módulo de Young, foi efetuado aos 28 dias de idade, tendo-se realizado o ensaio para a totalidade dos provetes produzidos, de acordo com a figura 23, no Capítulo 4.2.. Para tal recorreu-se ao processo descrito na norma NP EN 12504-4:2007 [IPQ, 2009], que especifica o método para a determinação da velocidade de propagação de ondas longitudinais ultrassónicas no betão.

O módulo de elasticidade é um parâmetro mecânico que caracteriza os materiais sólidos, através de uma medida de rigidez, considerando a velocidade de propagação dos ultrassons induzidos e a sua massa volúmica. A determinação do módulo de elasticidade permite aferir as propriedades mecânicas do betão, tais como a tensão de rotura e a deformabilidade [FERREIRA, 2015].

Para a determinação do módulo de elasticidade, utilizou-se o método de obtenção da velocidade de ondas ultrassónicas. O amortecimento das ondas é influenciado pela existência de poros no interior do betão, característica que quanto menor for, maior será a velocidade de propagação associada, que aumenta com a compacidade do material [ALMEIDA, 2012].

Esses impulsos são transmitidos e captados por um equipamento composto por dois transdutores que são colocados nas faces mais afastadas dos provetes, conforme figura 36. Um transdutor emite impulsos ultrassónicos e o outro recebe-os. Através da distância (comprimento do provete) que a onda longitudinal tem de percorrer do transdutor transmissor até ao recetor, dividida pelo tempo que a mesma demora a efetuar o percurso de atravessar o provete, obtém-se a velocidade de propagação [IPQ, 2007b].

Indicado para comprovar a descontinuidade do material, a velocidade de propagação do impulso de ultrassons pode ser também utilizada para a determinação da uniformidade do betão e aferir presença de poros.

Para a realização do ensaio, foi utilizada uma balança com precisão de 0,1 g (Kern/EG620-3 NM) para determinação da massa dos provetes e um medidor de velocidade de propagação de ultrassons (PROCEQ – Pundit Lab – Figura 36). De seguida, devido às irregularidades existentes nas faces dos provetes, aplicou-se um gel nos pontos de contacto entre os transdutores e o provete. Colocados os transdutores sobre o gel, iniciou-se o ensaio de leitura da onda ultrassónica. Através do equipamento registaram-se as velocidades de propagação de ultrassons, em m/s.

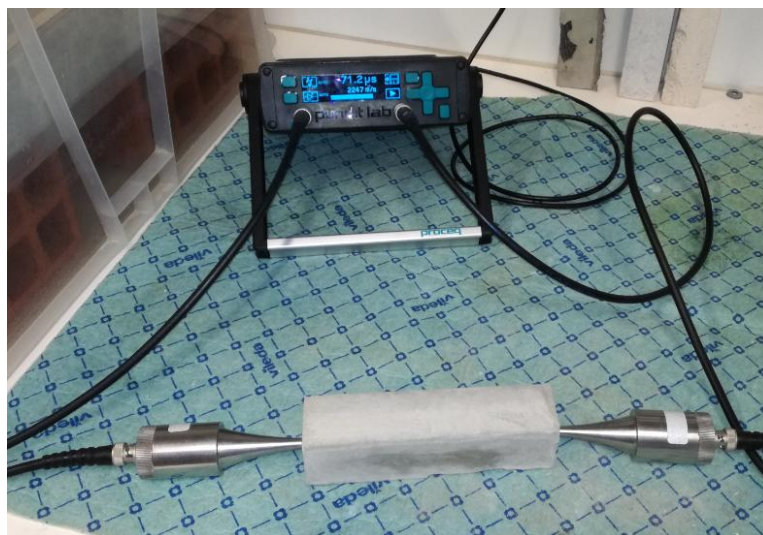


Figura 36 - Equipamento de ensaio do módulo de elasticidade dinâmico [Laboratório de Engenharia Civil, ESTBarreiro/IPS]

A determinação da velocidade de propagação de ultrassons permitiu calcular o módulo de elasticidade dinâmico (GPa), através da equação 11:

$$E_d = V^2 \times M.V. A_p \quad (\text{Equação 11})$$

em que:

V - velocidade de propagação dos ultrassons [km/s];

M. V. A_p - massa volúmica aparente [kg/m³].

4.5. CONDIÇÕES DE ESTUDO

4.5.1. CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA

Os provetes englobados nesta condição de estudo foram considerados como sendo os provetes de referência (Ref), por apresentarem as condições ótimas de cura, conforme o procedimento definido na norma NP EN 12390-2:2009 [IPQ, 2009a] e não tendo sido sujeitos a posterior exposição a ambiente agressivo.

Os provetes após serem produzidos e desmoldados ao fim de 24 horas foram sujeitos a condições de cura a uma temperatura de 20±5°C e humidade relativa superior a 95%, durante 28 dias. De forma a respeitar o regulamentado na norma de execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica, NP EN 12390-2:2009 [IPQ, 2009a], recorreu-se à submersão dos provetes em tanque de água, tal como ilustrado na figura 37. Após terminado o processo de cura, os provetes foram secos em estufa, a uma temperatura de 105±5°C durante 24 horas, até massa constante.



Figura 37 - Processo de cura padronizada dos provetes [Laboratório de Engenharia Civil, ESTBarreiro/IPS]

4.5.2. CONDIÇÕES AMBIENTAIS CORRENTES

De forma a simular as condições a que o betão será sujeito em vida após produção e desmoldagem ao fim de 24 horas, os provetes foram expostos a condições ambientais correntes (CA), fora de ambiente laboratorial, admitindo as condicionantes climatéricas ocorridas durante os restantes dias de cura.

Expostos à temperatura ambiente, humidade relativa do ar, vento e precipitação, os provetes efetuaram a cura nas imediações externas do edifício da Escola Superior de Tecnologias do Barreiro, situada na rua Américo da Silva Marinho nº36, na freguesia do Lavradio, pertencente ao concelho do Barreiro e ao distrito de Setúbal, tal como demonstrado na Figura 38.



Figura 38 - Ensaio de exposição a condições ambientais correntes [ESTBarreiro/IPS]

Para compreender as condições ambientais que condicionaram a cura do betão recorreu-se a um *síte* de controlo meteorológico www.tempo.pt [TEMPO.PT], de forma a recolher os dados de temperatura e humidade relativa do ar no período de cura.

O processo de cura teve a duração de 32 dias, compreendidos entre o dia 3 de Agosto e 4 de Setembro de 2017, onde as temperaturas rondaram os $25 \pm 10^\circ\text{C}$ (Figura 39) e a humidade relativa do ar, $60 \pm 10\%$ (Figura 40). Analisando a temperatura e humidade relativa médias que se observaram durante o tempo de cura, apresentadas na figura 41, concluiu-se que em relação à cura de referência, preconizada em 4.5.1., apenas para a humidade relativa se verificam valores diferentes aos descritos na norma NP EN 12390-2:2009 [IPQ, 2009a]. Dado por terminado o período de exposição às condições ambientais correntes, os provetes foram secos em estufa, a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 24 horas, até massa constante.

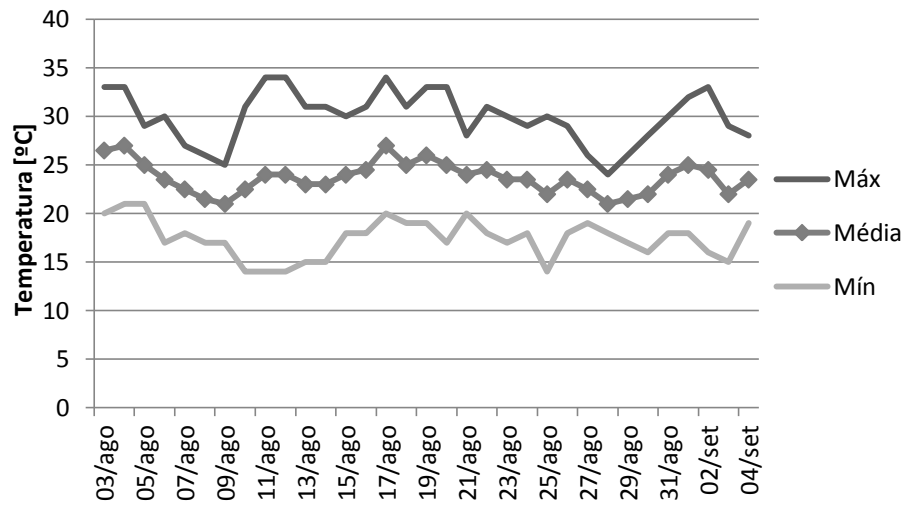


Figura 39 - Temperatura durante o ensaio de condições ambientais correntes

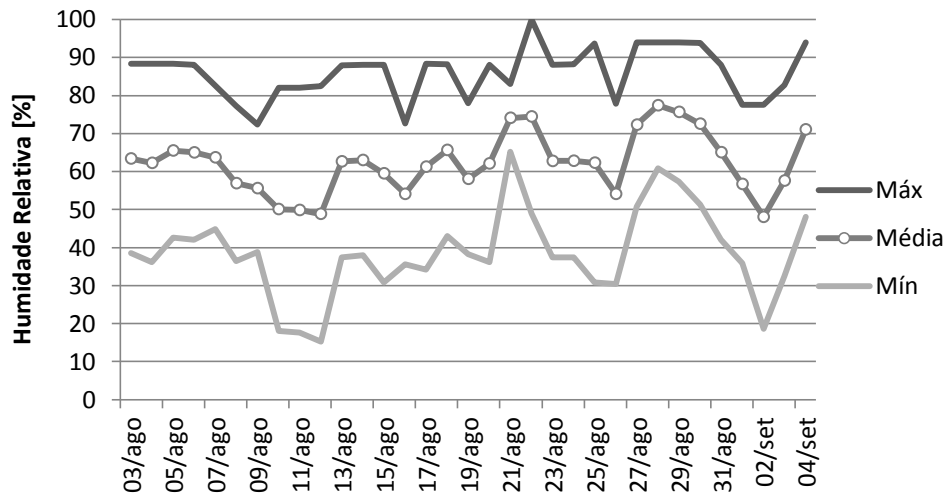


Figura 40 - Umidade Relativa durante o ensaio de condições ambientais correntes

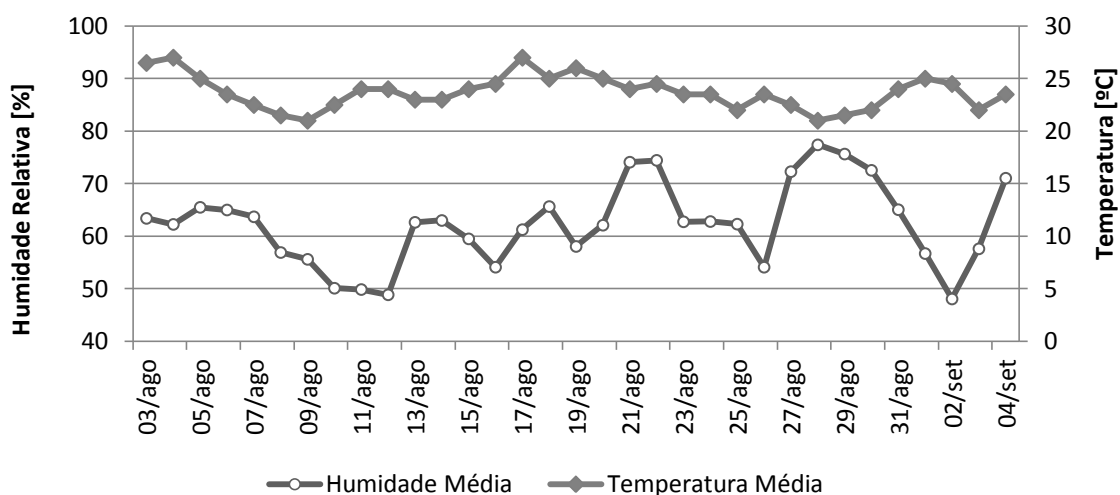


Figura 41 - Comparação da temperatura com a umidade relativa durante o ensaio de condições ambientais correntes

4.5.3. AMBIENTE MARÍTIMO SUBMERSO

De forma a estudar o ambiente marítimo como ambiente agressivo e os sais constituintes da água do mar como principal fator de degradação, os provetes foram submersos em água recolhida do mar.

Os provetes após serem produzidos e desmoldados ao fim de 24 horas foram imersos em água proveniente do oceano Atlântico, recolhida na praia da Fonte da Telha e armazenada durante um período 15 horas até ter sido utilizada num recipiente aberto onde foram submersos os provetes (AM), durante os restantes 31 dias de cura, conforme figura 42. Posteriormente os provetes foram retirados da água do mar, limpos superficialmente e secos em estufa a uma temperatura de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas, até massa constante.

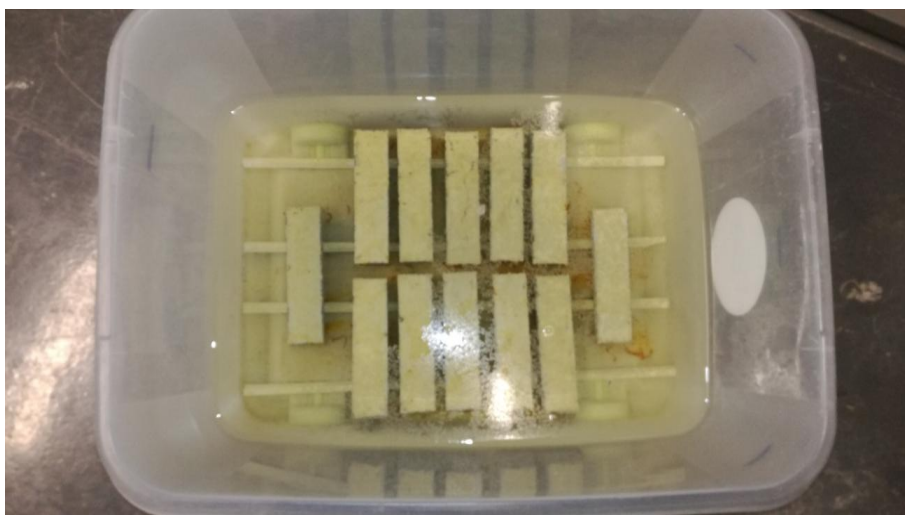


Figura 42 - Acondicionamento dos provetes submersos em água do mar [Laboratório de Engenharia Civil, ESTBarreiro/IPS]

4.5.4. GELO/DEGELO

O betão apresenta características porosas que lhe permitem a capacidade de armazenar água no seu interior. Quando são atingidas temperaturas negativas dá-se o congelamento e aumento do volume de água no interior do betão, provocando desgaste e danos à matriz cimentícia e por consequente a perda de resistência mecânica do betão.

Os provetes após serem produzidos e desmoldados ao fim de 24 horas foram curados a uma temperatura de $20 \pm 5^\circ\text{C}$ e humidade relativa superior a 95% durante 28 dias (condições de cura padrão), até massa constante.

De forma a avaliar o comportamento do betão quando sujeito ao ambiente agressivo de gelo/degelo foi utilizada uma câmara frigorífica (ARALAB - FITOCLIMA S 600 PH20 – Figura 43), onde os provetes (GD) foram submetidos a ciclos gelo/degelo de 12 horas, segundo os procedimentos adaptados da norma RILEM TC 117 [RILEM, 1994]. Tal como apresentado na figura 44, o ensaio teve início à temperatura estável de 20°C , deu-se início imediato ao arrefecimento da temperatura até aos -20°C , no decorrer de 4 horas. Após este patamar de temperatura ter sido atingido, foram mantidos os -20°C durante um período de 3 horas. De seguida a temperatura voltou a ser aumentada até aos 20°C num período de 4 horas, onde se manteve durante 1 hora, perfazendo assim um ciclo completo de 12 horas. Durante todo o processo, a humidade relativa foi mantida nos $60 \pm 5\%$, regulável através do equipamento utilizado. Ao fim de 6 ciclos de 12 horas cada, deu-se o ensaio por terminado e os provetes foram retirados e secos em estufa, a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 24 horas até massa constante [SETZER, 1996].



Figura 43 - Ensaio de ciclos gelo/degelo [Laboratório de Engenharia Civil, ESTBarreiro/IPS]

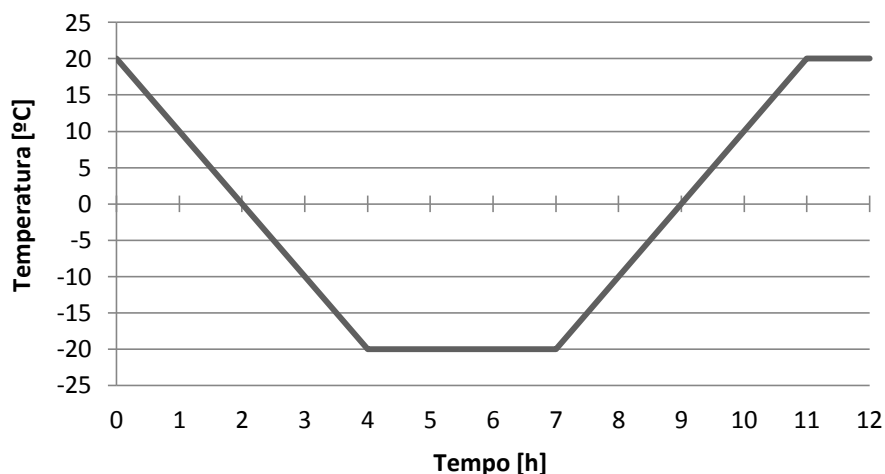


Figura 44 - Ciclo gelo/degelo [Adaptado de SETZER, 1996]

4.5.5. ALTAS TEMPERATURAS

O betão como importante material de construção é fortemente afetado pelas altas temperaturas que tem origem em causas naturais e na ação humana (tipo de utilização e desastres). Como tal, torna-se importante estudar o comportamento do betão quando exposto a altas temperaturas. Os danos provocados no betão dependem das temperaturas atingidas e do período de exposição, afetando fortemente as propriedades mecânicas do mesmo.

Os provetes, após serem produzidos e desmoldados ao fim de 24 horas, foram curados a uma temperatura de $20 \pm 5^\circ\text{C}$ e humidade relativa superior a 95% durante 28 dias (condições de cura padrão), sendo depois secos em estufa, a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 24 horas, até massa constante.

De forma a estudar o comportamento do SIMCON-BCC submetido a altas temperaturas (AT), os provetes foram sujeitos a uma temperatura de 800°C com recurso a uma mufla (SNOL - 30/1300L), conforme figura 45. A taxa de aquecimento utilizada foi de $12^\circ\text{C}/\text{min}$, tendo-se iniciado à temperatura ambiente de 28°C e atingido os 800°C num tempo de 1 hora e 6 minutos, tal como apresentado na figura 46. O ensaio foi efetuado conforme plano de ensaios realizados por Costa em 2012, adaptado da norma ISO 834-10:2014 [ISO, 2014].

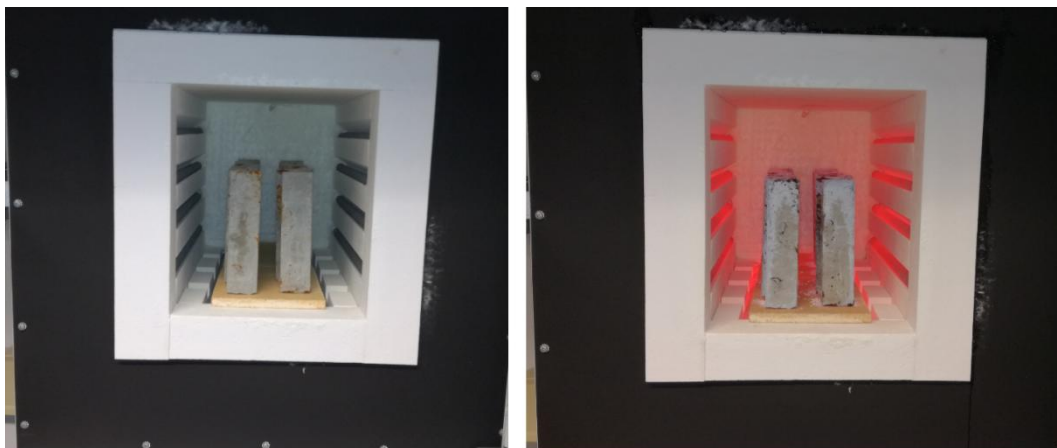


Figura 45 – Disposição dos provetes no interior da mufla [Laboratório de investigação da secção de Engenharia Química e Biológica, ESTBarreiro/IPS]

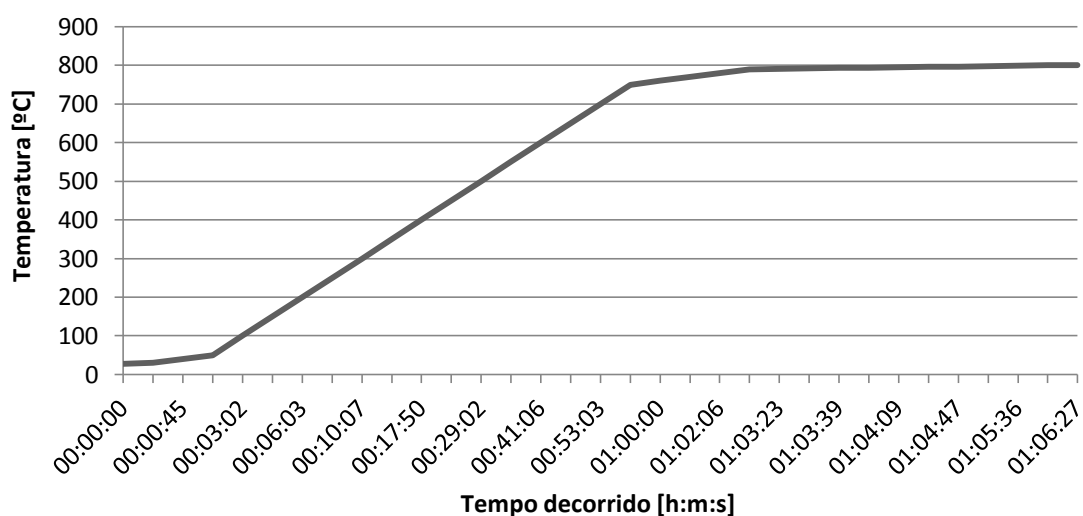


Figura 46 - Taxa de aquecimento da mufla [Laboratório de investigação da secção de Engenharia Química e Biológica, ESTBarreiro/IPS]

Após se ter atingida a temperatura de 800°C os provetes foram retirados da mufla e deu-se de imediato início ao seu arrefecimento, efetuado ao ar ambiente de laboratório, à semelhança do efetuado por Santos e Rodrigues em 2011, com um procedimento adotado da norma RILEM TC 200 [RILEM, 2007]. Ao fim de 30 minutos de arrefecimento, a temperatura superficial média dos provetes era de 280°C, valor determinado com recurso a medição através de câmara térmica de infravermelhos (FLIR - E6), tal como figura 47.

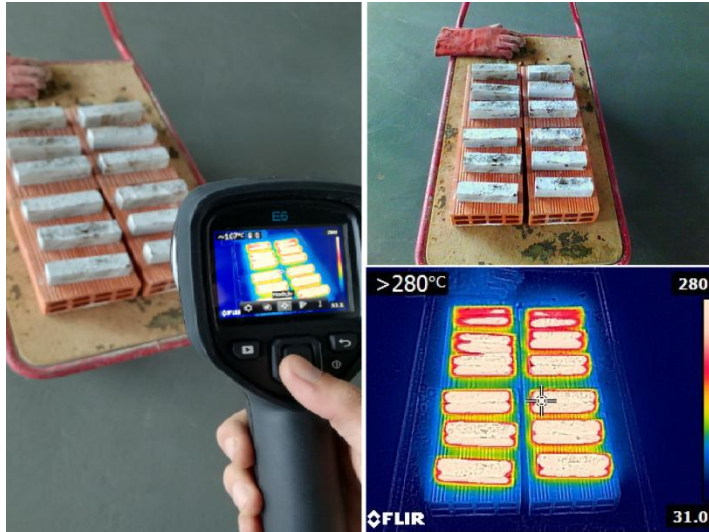


Figura 47 - Equipamento utilizado para determinar temperatura superficial dos provetes [Laboratório de Engenharia Civil, ESTBarreiro/IPS]

Deu-se por terminado o ensaio quando os provetes (AT) alcançaram a temperatura do ambiente laboratorial ($20 \pm 5^\circ\text{C}$), ao fim de 3 horas e 30 minutos de arrefecimento após remoção dos provetes da mufla, perfazendo uma taxa média de arrefecimento de $1,3^\circ\text{C}/\text{min}$.

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da campanha experimental realizada e analisados os valores obtidos nos ensaios efetuados nos estados fresco e endurecido, descritos nos Capítulos 4.3 e 4.4, respetivamente. Com os resultados obtidos, pretende-se avaliar, numa primeira instância a influência da presença de lã de aço na calda de cimento, e numa análise posterior, o comportamento dos provetes de SIMCON-BCC quando sujeitos a diferentes ambientes agressivos, tendo sempre como base de comparação o SIMCON-BCC sujeito a condições de cura padrão, denominados de provetes de referência (Ref). Como forma de tratamento dos resultados obtidos, recorreu-se às seguintes técnicas estatísticas.

Foi determinada a média (Equação 12), uma medida de tendência central, de forma a obter-se o valor médio do conjunto de resultados obtidos:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{Equação 12})$$

De forma a aferir o grau de dispersão dos resultados individuais obtidos, foi determinado o desvio padrão (Equação 13), que se apresenta com o mesmo grau de precisão da média [PINHEIRO, 2012]:

$$Dv. P = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \quad (\text{Equação 13})$$

O coeficiente de variação (Equação 14) é a característica que relaciona o desvio padrão com a média e permite avaliar a homogeneidade do conjunto de dados:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \times 100 \% \quad (\text{Equação 14})$$

Os resultados obtidos são referentes a um conjunto de procedimentos experimentais, realizados com recurso a equipamentos laboratoriais, que podem ter associados erros de procedimento, tais como erros de medição e/ou leitura, dando origem a resultados anormais. Assim, recorreu-se à ferramenta estatística *Box Plot* de forma a identificar os resultados anormais, também denominados de *outliers* e foi efetuada uma análise comparativa de dados, determinando a sua tendência central, dispersão e homogeneidade [ENGINEERING STATISTICS, 2014]. A identificação dos *outliers* permite identificar e excluir valores extremos do conjunto total de resultados, que possam influenciar a média e o desvio padrão, comprometendo a exatidão do ensaio, obtendo-se assim um conjunto de resultados mais representativos.

De forma a analisar os dados obtidos adotou-se uma escala de impacto que demonstra a influência que cada resultado individual tem na média respetiva. Dividiu-se assim, o conjunto de resultados em duas classes (valores na ordem dos milhares e valores na ordem das centenas, dezenas e unidades) para facilitar a identificação dos *outliers*. Nos valores da ordem dos milhares consideraram-se intervalos de variação mais pequenos, conforme tabela 7, de forma a garantir a efetividade da análise. Estes intervalos foram aplicados aos resultados dos ensaios de determinação da massa volúmica no estado fresco, massa volúmica aparente e real. Nos valores da ordem das centenas, dezenas e unidades foram adotados intervalos de variação maiores (tabela 8), sendo estes aplicados nos restantes ensaios realizados.

Tabela 7 - Impacto dos resultados individuais em relação à média, para resultados da ordem de grandeza dos milhares

Variação	Impacto
0 – 1 %	Semelhante
2 – 3 %	Ligeiro
4 – 5 %	Significativo
> 5 %	Acentuado

Tabela 8 - Impacto dos resultados individuais em relação à média, para resultados da ordem de grandeza das centenas, dezenas e unidades

Variação	Impacto
0 – 10 %	Semelhante
11 – 20 %	Ligeiro
21 – 50 %	Significativo
> 51 %	Acentuado

5.1. RESULTADOS REFERENTES À CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO

O betão no estado fresco apresenta propriedades enquanto pasta cimentícia, que servem de base à sua avaliação antes de este ser aplicado. A consistência, a homogeneização e a capacidade de fluidez são fatores que influenciam a trabalhabilidade e a capacidade de acabamento do betão. A trabalhabilidade, enquanto uma das características mais determinantes do betão no estado fresco, relaciona-se diretamente com o método e duração do seu transporte (facilidade de colocação, consolidação e acabamento), com a quantidade e características dos materiais constituintes (ligante, água, agregados, adições e adjuvante) e a sua distribuição uniforme, e com as condições do meio ambiente [SANTOS, 2011].

De um modo geral, o betão fresco deve ser capaz de ser facilmente misturado e transportado, mantendo-se uniforme e consistente para diferentes condições. Deve ter fluidez que lhe permita preencher por completo os moldes onde é depositado, ter a capacidade de ser compactado sem recurso a quantidades de energia excessivas, não deve, durante o transporte, colocação e compactação, apresentar segregação e, deve ser capaz de ser devidamente acabado [BARBOSA, 2013]. As mesmas características são exigidas às caldas de cimento.

Relembra-se que foram realizadas 7 amassaduras para a produção de 72 provetes de ensaio, sujeitos por 6 ambientes de exposição diferentes (Capítulo 4.1. e 4.2.). Importa reforçar que, apesar de não terem sido produzidas no mesmo dia e de se destinarem posteriormente a condições de cura e a ambientes de exposição distintos, todas as misturas produzidas apresentam a mesma formulação e foram produzidas com iguais procedimentos de amassadura.

5.1.1. DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO

O ensaio de determinação da consistência por espalhamento foi efetuado conforme descrito em 4.3.1. e fornece informações sobre o comportamento da pasta cimentícia no estado fresco. Através do espalhamento da pasta cimentícia consegue-se aferir a trabalhabilidade. Pode ser efetuado ainda durante a fase de amassadura, permitindo aferir e avaliar a consistência da matriz cimentícia no estado fresco, com a vantagem de se poder corrigir a mistura ainda na fase de amassadura. No caso específico da produção de SIMCON-BCC, a determinação do espalhamento tem como principal objetivo avaliar a capacidade de infiltração da pasta cimentícia na lâ de aço.

Os valores médios obtidos através de medição em duas direções perpendiculares de espalhamento encontram-se apresentados de forma organizada na tabela 9 e de forma gráfica na figura 48, para as amassaduras efetuadas.

Tabela 9 - Espalhamento da pasta cimentícia das amassaduras efetuadas (apresentação e interpretação)

Amassadura	Esp. [mm]	Dv.P	CV [%]
0%	278	0	0,1
Ref	211	6	2,6
CA	241	6	2,5
AM	267	2	0,7
GD	211	3	1,2
AT	213	0	0,2

Esp. – espalhamento

Dv.P - desvio padrão; CV - coeficiente de variação

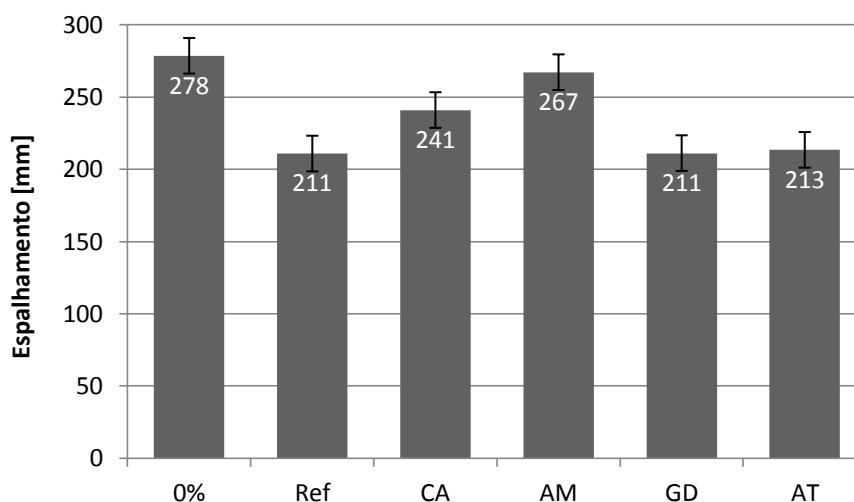


Figura 48 - Espalhamento da pasta cimentícia das amassaduras efetuadas

Considerando que as misturas possuem igual composição e procedimento de produção, seria de esperar que os valores de espalhamento obtidos fossem iguais. No entanto, observaram-se algumas diferenças, nomeadamente na mistura relativa aos provetes de betão simples (0%), que difere do valor médio de espalhamento (229mm) em 21%. A diferença acentuada do espalhamento da amassadura mencionada pode ser explicada pela humidade relativa que se fez sentir no dia de produção da mesma, que em relação às condições ambientais das restantes amassaduras foi superior, conforme tabela 10. O espalhamento das restantes misturas efetuadas difere da média em 17%, mantendo-se dentro dos parâmetros espectáveis.

Tabela 10 - Condições climáticas durante a produção das misturas

Amassadura	Dia	Hora	T [°C]	HR [%]
CA	1º	12:45 - 13:00	26,3	43
AM	1º	15:15 - 15:30	26,3	43
0%	2º	10:15 - 10:30	27,5	64
GD	3º	10:15 - 10:30	26,9	52
Ref	3º	11:35 - 11:50	27,1	52
AT	3º	14:30 - 14:45	27,6	52

5.1.2. DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA APARENTE NO ESTADO FRESCO

O ensaio da determinação da massa volúmica aparente, da pasta cimentícia no estado fresco foi efetuado com base no procedimento descrito em 4.3.2.. A realização do ensaio fornece informações acerca da relação entre a massa e o volume do betão produzido, e diz respeito, maioritariamente à massa volúmica de cada um dos constituintes que compõem a mistura. O método consiste na colocação da pasta cimentícia num recipiente rígido e estanque, de massa e volume conhecidos. É registada a massa da pasta cimentícia e dividida pelo volume que a mesma ocupa.

Os resultados do ensaio encontram-se apresentados de forma organizada na tabela 11 e de forma gráfica na figura 49.

Tabela 11 - Massa volúmica no estado fresco das amassaduras efetuadas (apresentação e interpretação)

Mistura	M.V.Est. Fresco [kg/m³]	Dv.P	CV [%]
0%	2020	26	1,3
Ref	2000	1	0,0
CA	2110	78	3,7
AM	2060	0	0,0
GD	2070	16	0,8
AT	2070	27	1,3

M.V.Est. Fresco - massa volúmica no estado fresco

Dv.P - desvio padrão; CV - coeficiente de variação

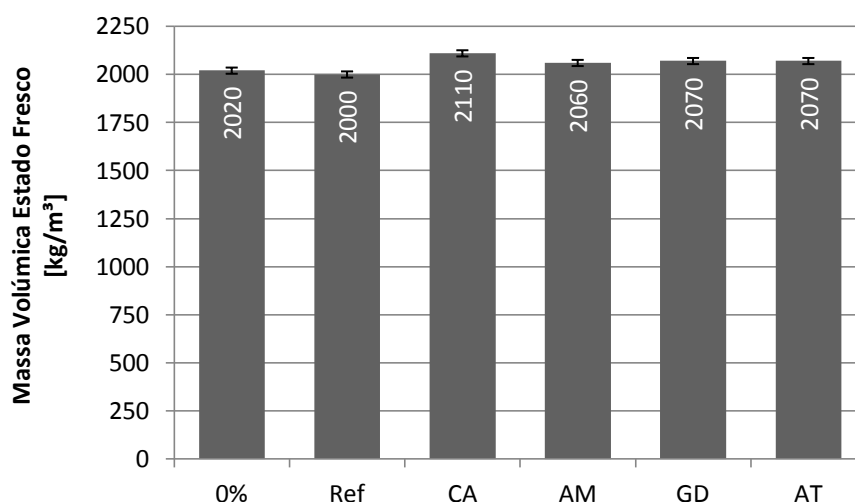


Figura 49 - Massa volúmica no estado fresco das amassaduras efetuadas

Após análise da tabela 11 e da figura 49, verificou-se que não existem diferenças de resultados superiores a 3% em relação à média (2060kg/m³) da massa volúmica aparente no estado fresco das misturas efetuadas.

5.2. RESULTADOS REFERENTES À CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO

Em relação ao betão no estado endurecido, o conjunto de ensaios preconizado neste trabalho permite a determinação do comportamento do betão. Os ensaios realizados no estado endurecido dizem respeito à caracterização do desempenho mecânico (das tensões de tração por flexão e de compressão), da absorção de água (por capilaridade e por imersão com recurso a vácuo) e das características físicas do betão (determinação das massas volúmicas, porosidades e velocidade de propagação de ultrassons). Os provetes foram desmoldados 24 horas após produção e moldagem, de seguida foram sujeitos às condições de cura e aos ambientes resumidos na figura 50 e descritos no Capítulo 4.5. Após as condições referidas, quer de cura quer de ambiente, os provetes passaram por um processo de secagem em estufa, a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 24 horas, e foram finalmente submetidos ao conjunto de ensaios apresentados no Capítulo 4.4..

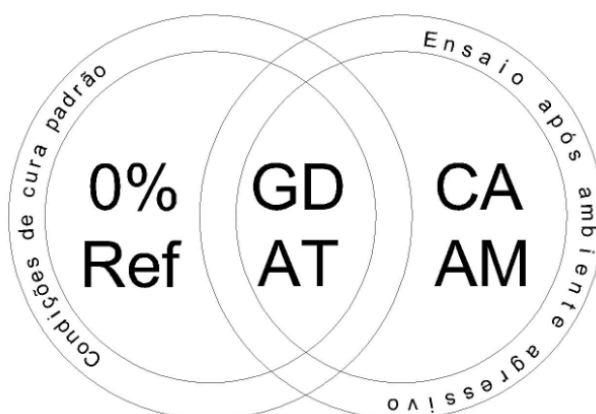


Figura 50 - Condições de cura referentes a cada ambiente estudado

5.2.1. MASSA VOLÚMICA APARENTE

A determinação da massa volúmica do betão no estado endurecido parte do pressuposto que o provete a ensaiar é homogêneo e isotrópico. Posto isto, a massa volúmica aparente é determinada através da obtenção da massa do provete com recurso a uma balança, a qual se divide pelo volume do mesmo, tal como explicado em 4.4.1.. A massa volúmica de um material estrutural é um parâmetro importante no dimensionamento de uma estrutura, pois é necessária, entre outros, para o cálculo do peso próprio [OSÓRIO, 2006]. Trata-se de uma característica física importante pois está relacionada com a percentagem de poros e com a permeabilidade do betão [YAN 2013].

Os valores médios obtidos referentes à massa volúmica aparente encontram-se apresentados, de forma organizada na tabela 12 e de forma gráfica na figura 51, para os provetes sujeitos às diferentes condições referidas em 4.5..

Tabela 12 - Massa volúmica aparente dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (apresentação e interpretação)

Mistura	M.V.Ap [kg/m³]	Dv.P	CV [%]
0%	1890	30	1,6
Ref	2030	18	0,9
CA	1930	32	1,7
AM	2070	9	0,4
GD	2000	17	0,9
AT	1730	15	0,8

M.V.Ap - massa volúmica aparente

Dv.P - desvio padrão; CV - coeficiente de variação

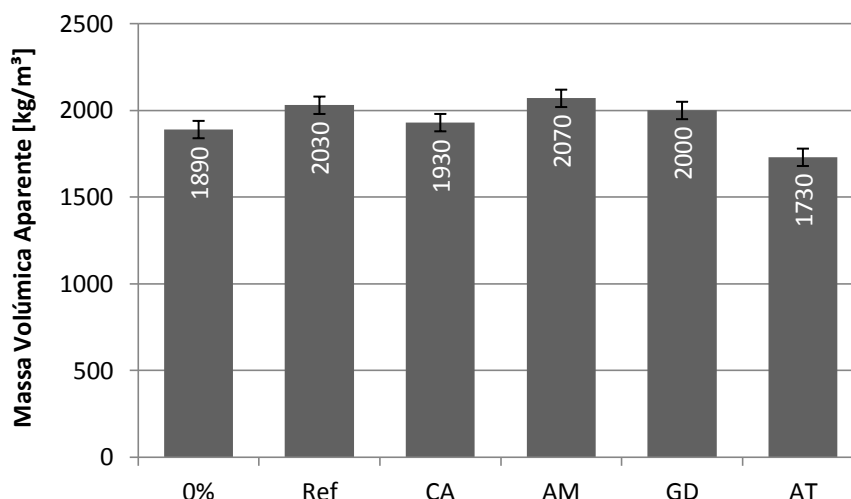


Figura 51 - Massa volúmica aparente dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

Após análise dos resultados e comparando os provetes de referência (Ref) com os compostos por betão simples (0 %), verificou-se uma diminuição da massa volúmica aparente de aproximadamente 7 %. Relativamente à massa volúmica dos provetes sujeitos às condições ambientais correntes (CA), houve uma diminuição de 5 % em relação aos de referência (Ref). Comparando os provetes sujeitos a altas temperaturas (AT) com os de referência (Ref), a diminuição foi de 15 %, sendo esta a maior diferença de massa volúmica aparente registada relativamente aos provetes de referência. Nos restantes provetes, sujeitos ao ambiente marítimo (AM) e a ciclos de gelo/degelo (GD), a diferença dos valores em relação aos de referência (Ref) foi inferior a 2 %. É de salientar que todos os provetes ensaiados, com exceção dos expostos a altas temperaturas (AT), se enquadram na classe referente a betões de densidade normal, com massas volúmicas aparentes que rondam os 2000 kg/m³ [NP EN 206-1:2007].

5.2.2. DETERMINAÇÃO DAS MASSAS VOLÚMICAS E POROSIDADES

A massa volúmica quando determinada no estado fresco, diz respeito maioritariamente à massa volúmica de cada um dos seus constituintes como um conjunto, não significando que quando calculada a massa volúmica aparente no estado endurecido se obtenham os mesmos resultados e se retirem as mesmas conclusões. O grau de compactidade, o teor de água e as condições de temperatura e humidade no processo, desde a produção até ao momento de ensaio, são fatores determinantes e fazem variar os parâmetros de massa volúmica e de porosidade do betão [DIAS, 2015].

A água como fator de hidratação do ligante e como elemento de ligação dos restantes componentes torna-se fundamental na composição da matriz de betão. Durante o processo de cura do mesmo, uma parte da água é absorvida pelos agregados e na hidratação do

ligante, enquanto a outra parte é evaporada através da fronteira do betão com o meio ambiente. Esta migração e perda de água resultam em espaços vazios deixados no interior do betão, denominados de poros, que têm influência nas capacidades resistentes e de absorção de água do betão. O ensaio da absorção de água por imersão consiste em fazer penetrar água de forma forçada no interior do betão, recorrendo a diferenças de pressão, ocorrendo aos 28 dias de idade dos provetes, tal como descrito em 4.4.2..

Em seguida são apresentados os valores médios obtidos para o volume de poros abertos, apresentados de forma organizada e gráfica na tabela 13 e na figura 52 respetivamente, para os provetes sujeitos a diferentes tipos de ambientes.

Tabela 13 - Volume de poros abertos dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (apresentação e interpretação)

Mistura	V.P.Ab [ml]	Dv.P	CV [%]
0%	26,9	0,3	1,0
Ref	28,9	1,5	5,2
CA	41,6	1,4	3,4
AM	26,4	1,0	3,9
GD	30,8	0,6	1,9
AT	60,5	2,2	3,7

V.P.Ab - volume de poros abertos

Dv.P - desvio padrão; CV - coeficiente de variação

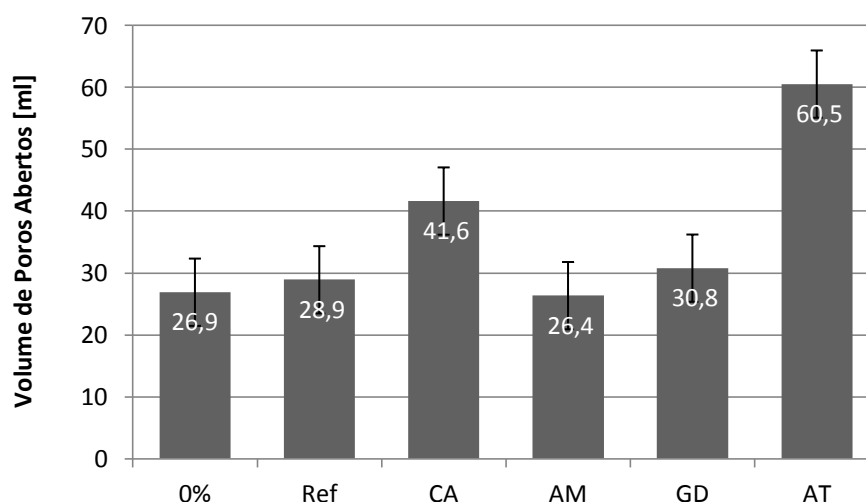


Figura 52 - Volume de poros abertos dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

A tabela 13 e a figura 52 permitem observar os valores médios obtidos para o volume de poros abertos dos provetes, determinados através do ensaio descrito em 4.4.2.. Comparando os provetes de betão simples (0%), os sujeitos ao ambiente marítimo (AM) e os submetidos a ciclos de gelo/degelo (GD) com os de referência (Ref), verificou-se uma variação da média do volume de poros acessíveis inferior a 10%. Os provetes sujeitos a condições ambientais (CA) apresentam um acréscimo de volume de poros abertos de 44% em relação aos de referência (Ref). Os provetes caracterizados pela exposição a altas temperaturas (AT), apresentaram um acréscimo de 110% de volume de poros abertos em relação aos de referência (Ref), sendo este o caso mais gravoso.

Os resultados médios obtidos para o volume aparente dos provetes encontram-se apresentados de forma organizada na tabela 14 e de forma gráfica na figura 53.

Tabela 14 - Volume aparente dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (apresentação e interpretação)

Mistura	V.Ap [ml]	Dv.P	CV [%]
0%	124,4	4,3	3,5
Ref	133,1	7,0	5,3
CA	135,2	5,3	3,9
AM	128,9	4,6	3,6
GD	130,8	1,9	1,4
AT	126,4	3,6	2,8

V.Ap - volume aparente

Dv.P - desvio padrão; CV - coeficiente de variação

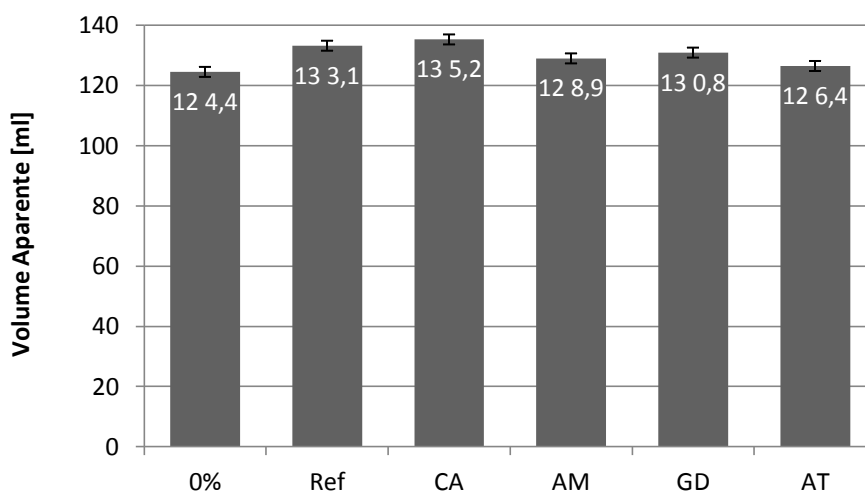


Figura 53 - Volume aparente dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

Através dos dados da tabela 14 e da figura 53, verifica-se que todos os provetes ensaiados apresentam variações inferiores a 7% em relação aos provetes de referência (Ref). A dimensão dos provetes tem influência nos resultados obtidos em determinados ensaios, como é o caso da determinação das porosidades, massas volúmicas e resistências mecânicas [OSÓRIO, 2006]. Na determinação do volume aparente utilizaram-se porções dos provetes iniciais/completos (resultantes do ensaio de flexão) como descrito no Capítulo 4.2.. Os valores obtidos para o volume aparente mostram que os provetes apresentam dimensões aproximadas, não influenciando desta forma os resultados dos restantes ensaios.

Na tabela 15 são mostrados os valores médios obtidos para a massa volúmica aparente dos provetes, apresentados de forma organizada e na figura 54, de forma gráfica.

Tabela 15 - Massa volúmica aparente dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (apresentação e interpretação)

Mistura	M.V.Ap [kg/m ³]	Dv.P	CV [%]
0%	1930	9	0,5
Ref	1960	11	0,6
CA	1920	5	0,2
AM	2000	3	0,2
GD	1950	8	0,4
AT	1770	7	0,4

M.V.Ap - massa volúmica aparente

Dv.P - desvio padrão; CV - coeficiente de variação

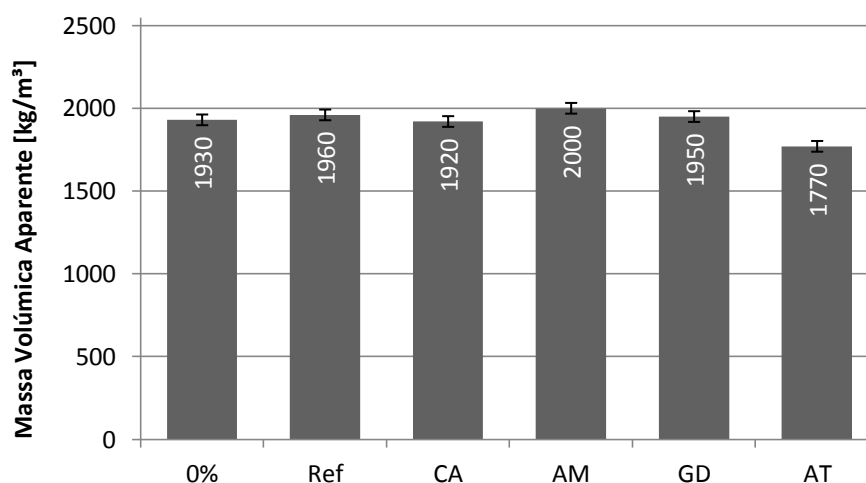


Figura 54 - Massa volúmica aparente dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

Analisando os valores das massas volúmicas aparentes constantes na tabela 15 e na figura 54, verificou-se que, em relação aos provetes de referência (Ref), os com 0% de fibra e os sujeitos a condições ambientais (CA), ambiente marítimo (AM) e a ciclos de gelo/degelo (GD) obtiveram variações do valor médio inferiores a 2%. Os provetes submetidos a altas temperaturas (AT), obtiveram uma diminuição de aproximadamente 10% na massa volúmica aparente em relação aos de referência (Ref).

A seguir, apresenta-se de forma gráfica na figura 16 e de forma organizada na tabela 55 os resultados médios obtidos para a massa volúmica real dos provetes.

Tabela 16 - Massa volúmica real dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (apresentação e interpretação)

Mistura	M.V.Real [kg/m ³]	Dv.P	CV [%]
0%	2470	6	0,3
Ref	2510	14	0,6
CA	2770	14	0,5
AM	2520	7	0,3
GD	2560	10	0,4
AT	3400	30	0,9

M.V.Real - massa volúmica real

Dv.P - desvio padrão; CV - coeficiente de variação

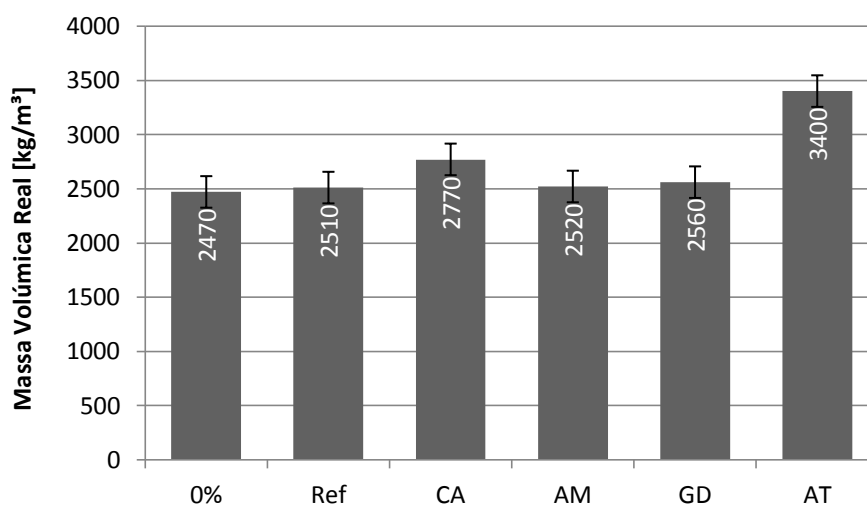


Figura 55 - Massa volúmica real dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

Comparando os resultados obtidos para a massa volúmica real, através da análise dos resultados organizados na tabela 16 e na figura 55, verificou-se que para os provetes com 0% de fibra, para os submetidos aos ambientes de gelo/degelo (GD) e marítimo (AM), as variações em relação aos de referência foram inferiores a 2%. Nos restantes provetes, sujeitos às condições ambientais (CA) e a altas temperaturas (AT), verificou-se um acréscimo de massa volúmica real em relação aos de referência (Ref), na ordem dos 10% e 35%, respetivamente.

Seguidamente encontram-se apresentados os valores médios obtidos para a porosidade aberta, de forma organizada na tabela 17 e de forma gráfica na figura 56.

Tabela 17 - Porosidade aberta dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (apresentação e interpretação)

Mistura	Pa [%]	Dv.P	CV [%]
0%	21,7	0,6	2,7
Ref	21,7	0,6	2,8
CA	30,8	0,3	1,0
AM	20,5	0,3	1,2
GD	23,5	0,4	1,7
AT	47,9	0,6	1,3

Pa - porosidade aberta

Dv.P - desvio padrão; CV - coeficiente de variação

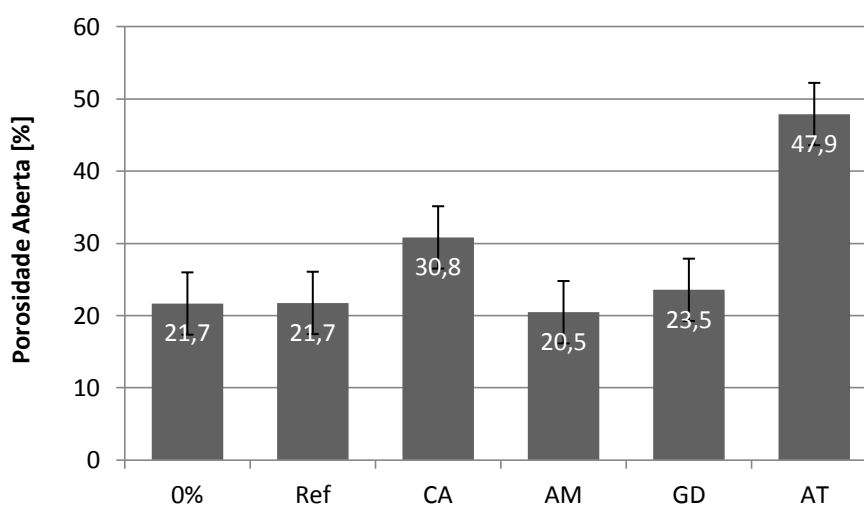


Figura 56 - Porosidade aberta dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

É possível observar na tabela 18 e na figura 57 os valores médios obtidos para a porosidade total dos provetes, apresentados de forma organizada e de forma gráfica respectivamente.

Tabela 18 - Porosidade total dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (apresentação e interpretação)

Mistura	Pt [%]	Dv.P	CV [%]
0%	21,8	0,6	2,6
Ref	21,9	0,6	2,8
CA	30,9	0,3	1,0
AM	20,6	0,3	1,2
GD	23,7	0,4	1,7
AT	48,0	0,6	1,3

Pt - porosidade total

Dv.P - desvio padrão; CV - coeficiente de variação

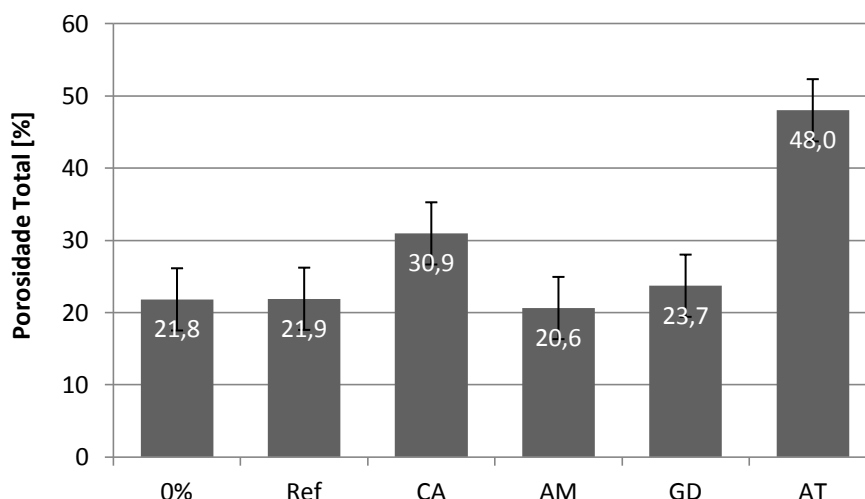


Figura 57 - Porosidade total dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

Quando comparadas as porosidades, aberta e total, verificou-se que a diferença entre ambas é mínima, como é apresentada na tabela 19. Esta diferença diz respeito à porosidade fechada (Pf), significando que, aproximadamente 99,5% dos poros existentes são acessíveis e interligados entre si (poros abertos).

Considerando as porosidades obtidas, os provetes de betão simples (0%) quando comparados com os de referência (Ref), sofreram uma diminuição de 0,4%. Os provetes

sujeitos a ciclos de gelo/degelo (GD) e ao ambiente marítimo (AM) apresentaram variações de porosidade inferiores a 10% (de 23,7% para 21,9% e de 20,6% para 21,9% na porosidade, respetivamente) em relação aos de referência (Ref). Os provetes submetidos a condições ambientais (CA) apresentam um aumento de porosidade de 45% (de 21,9% para 30,9% na porosidade) em relação aos de referência (Ref). O caso de estudo mais notório remete para o ambiente de altas temperaturas (AT), onde se verificou um aumento de porosidade na ordem dos 120% (de 21,9% para 48% na porosidade), em relação aos provetes de referência (Ref).

Tabela 19 - Porosidades referentes aos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

Mistura	Pt [%]	Pa [%]	Pf [%]
0%	21,8	21,7	0,1
Ref	21,9	21,7	0,2
CA	30,9	30,8	0,1
AM	20,6	20,5	0,1
GD	23,7	23,5	0,2
AT	48,0	47,9	0,1

Em seguida, são apresentados os valores médios da absorção de água dos provetes determinada por imersão com recurso a vácuo, de forma organizada na tabela 20 e de forma gráfica na figura 58.

Tabela 20 - Absorção de água dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (apresentação e interpretação)

Mistura	Abs. Água [%]	Dv.P	CV [%]
0%	11,2	0,4	3,1
Ref	11,1	0,4	3,2
CA	16,0	0,2	1,1
AM	10,2	0,1	1,3
GD	12,0	0,2	2,0
AT	27,0	0,4	1,6

Abs. Água - absorção de água

Dv.P - desvio padrão; CV - coeficiente de variação

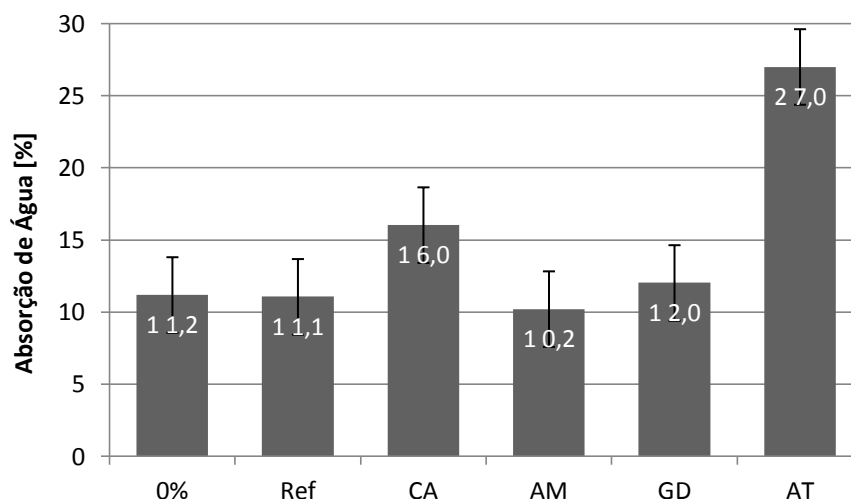


Figura 58 - Absorção de água dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

Comparando os resultados obtidos para a absorção de água, com recurso à análise da tabela 20 e da figura 58, verificou-se que os provetes de betão simples (0%), comparando com os de referência (Ref) registaram um aumento de 1% na absorção de água. Os provetes submetidos ao ambiente marítimo (AM) e a ciclos de gelo/degelo (GD) apresentam variações de absorção de água inferiores a 10% (de 10,2% para 11,1% e de 12,0% para 11,1%) em relação à referência (Ref). Nos provetes sujeitos a condições ambientais (CA) verificou-se um aumento de absorção de água de aproximadamente 45% (de 11,1% para 16,0%) em relação à referência (Ref). Os provetes, que estiveram expostos a altas temperaturas (AT), apresentaram a maior variação de absorção de água em relação aos de referência (Ref), com um aumento de aproximadamente 145% (11,1% para 27,0%).

5.2.3. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade permite aferir a quantidade de água que o betão consegue absorver e reter no seu interior, através da sua rede capilar. A quantidade e velocidade de absorção de água fornecem indicações referentes à quantidade de poros acessíveis e à rede capilar existentes no interior do betão. Os espaços anteriormente ocupados pela água da amassadura, que evaporou durante a cura, e o arranjo dos constituintes que compõem a matriz de betão, dão lugar a poros, disponíveis e recetíveis a fluidos. Assim, compreende-se que, no estado endurecido os compósitos cimentícios apresentem porosidade e permeabilidade, tal como foi mencionado em 5.2.2..

O coeficiente de capilaridade (CC) determina-se a partir do declive dos gráficos que contemplam o quociente da quantidade de água absorvida por unidade de área de contacto com a mesma (40x40mm), em função do tempo. A escala temporal onde a absorção de água é maior, diz respeito ao período compreendido entre o início e a primeira hora de ensaio, mais concretamente no período entre os 5 e os 60 minutos [DIAS, 2015]. Na tabela 21 constam os valores médios de 6 provetes de cada mistura. Na figura 59, referente às

curvas de absorção de água dos provetes, onde é possível analisar os primeiros 60 minutos de ensaio, com leituras efetuadas aos 0, 5, 10, 15, 30 e 60 min, apresentadas na figura 60 através das raízes do tempo, em minutos. Identificou-se que, o período de tempo onde o aumento da absorção de água dos provetes foi maior, se situa entre os minutos 5 e 60, como referido anteriormente.

Tabela 21 - Coeficiente de capilaridade dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (apresentação e interpretação)

Mistura	CC [kg/m ² .min ^{0,5}]	Dv.P	CV [%]
0%	0,305	0,053	17,5
Ref	0,305	0,036	11,9
CA	0,684	0,157	23,0
AM	0,467	0,098	20,9
GD	0,374	0,028	7,6
AT	1,344	0,846	63,0

CC- coeficiente de capilaridade

Dv.P - desvio padrão; CV - coeficiente de variação

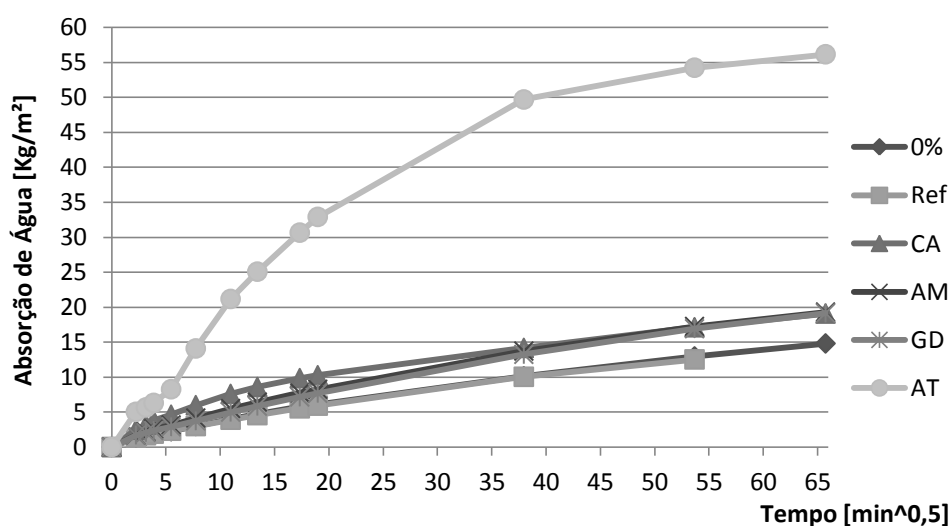


Figura 59 - Curvas de absorção de água por capilaridade dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (tempo total do ensaio)

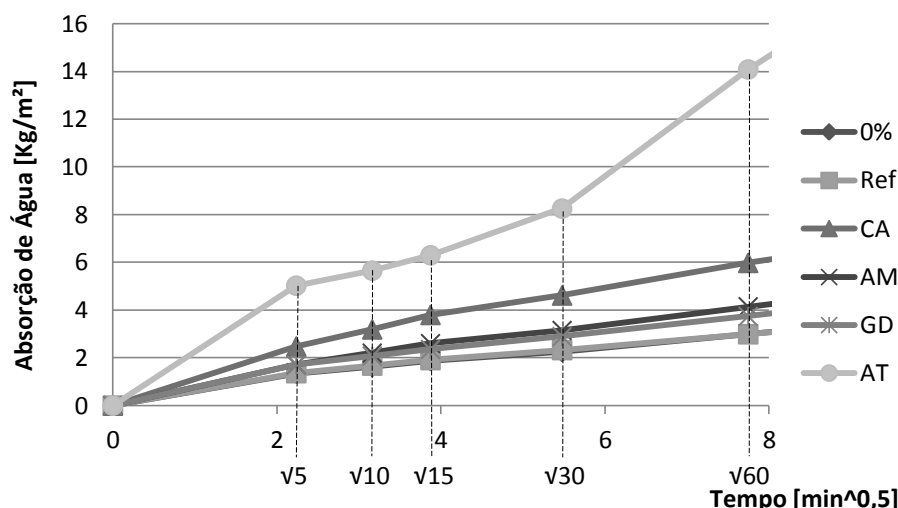


Figura 60 - Curvas de absorção de água por capilaridade dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (1ª hora de ensaio)

Após análise dos gráficos das figuras 59 e 60 e dos dados da tabela 21, verifica-se que os provetes produzidos com betão simples (0%) e os de referência (Ref) apresentam um coeficiente de capilaridade (CC) igual ($0,305 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$). Os provetes que curaram em condições ambientais correntes (CA) obtiveram um CC, aproximadamente, 124% superior aos de referência (Ref). Nos provetes sujeitos a ciclos gelo/degelo (GD) o aumento do CC foi de 22% e os que curaram em água marítima (AM) apresentaram um aumento de 53% quando comparados com os de referência (Ref). No caso dos provetes sujeitos a altas temperaturas (AT), que representam o ambiente mais agressivo, tal como se pode verificar na figura 59, o aumento do CC, em relação aos provetes de referência (Ref) foi de aproximadamente 340%.

5.2.4. RESISTÊNCIA À FLEXÃO

O ensaio da resistência à flexão permite determinar o comportamento do betão quando sujeito a forças de tração por flexão, tal como referido em 4.4.4.. O betão simples apresenta um comportamento frágil e uma capacidade baixa de deformação antes da rotura, quando sujeito a esforços de tração por flexão. A presença de fibras em toda a extensão do SIMCON faz com que as tensões na secção sujeita à flexão sejam distribuídas e atenuadas ao longo do mesmo. O comportamento do SIMCON, após ter atingido a carga máxima e se dar a rotura é melhorado devido à maior capacidade de absorção de energia por parte das fibras [ACI Committe 544, 1997].

Os valores médios obtidos no ensaio de resistência à tração por flexão encontram-se apresentados de forma organizada na tabela 22 e de forma gráfica na figura 61, para os provetes sujeitos a diferentes tipos de ambientes.

Tabela 22 - Resistência à tração por flexão dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (apresentação e interpretação)

Mistura	Rt [MPa]	Dv.P	CV [%]
0%	0,9	0,1	0,1
Ref	27,3	2,7	9,9
CA	23,3	2,2	9,3
AM	21,7	2,0	9,1
GD	28,5	3,2	11,3
AT	10,3	0,7	6,6

Rt - resistência à tração por flexão

Dv.P - desvio padrão; CV - coeficiente de variação

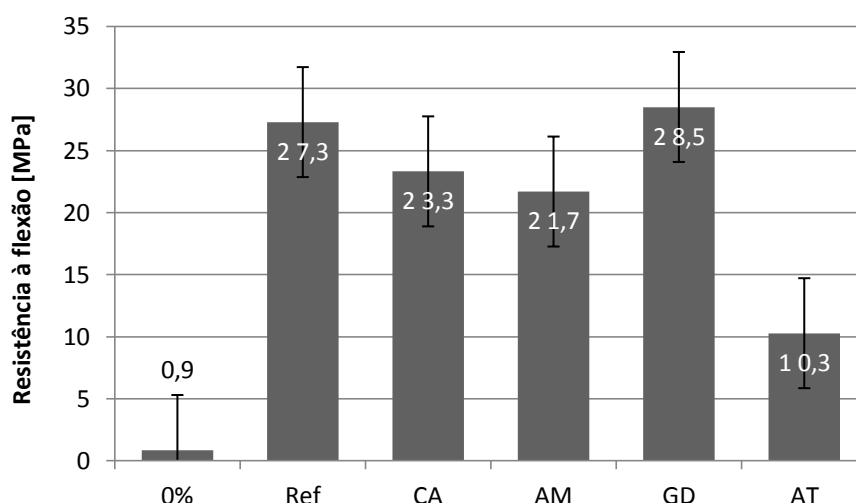


Figura 61 - Resistência à tração por flexão dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

Quando comparadas as resistências à tração por flexão, nomeadamente dos provetes com betão simples (0%) com os de referência (Ref), é notório que a adição de fibras melhora substancialmente a resistência à flexão do betão. Quando comparados os provetes sujeitos a ciclos de gelo/degelo (GD) com os de referência (Ref), verificou-se um aumento na ordem dos 5%. Para os provetes sujeitos às condições ambientais (CA) e ao ambiente marítimo submerso (AM) a diminuição da resistência à flexão foi entre os 15% e os 20%, em relação à referência (Ref). Os provetes com maior perda de resistência à flexão foram os sujeitos a temperaturas de 800°C (AT), onde se verificou uma diminuição de aproximadamente 63%, face aos de referência (Ref).

5.2.5. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio da resistência à compressão permite determinar a capacidade do betão resistir a tensões de compressão. A resistência à compressão é uma das características mecânicas mais importantes do betão e é determinada através da aplicação de uma carga até o provete atingir a rotura. Relaciona-se com as restantes características do betão, como é o caso da massa volúmica e da quantidade de poros existente e pode ser influenciada pelas condições de cura e idade do betão [COSTA, 2002].

Na tabela 23 e na figura 62 são apresentados os valores médios obtidos no ensaio da resistência à compressão dos provetes, como descrito em 4.4.5., apresentados de forma organizada e de forma gráfica respetivamente.

Tabela 23 - Resistência à compressão dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (apresentação e interpretação)

Mistura	Rc [MPa]	Dv.P	CV [%]
0%	93,4	2,6	2,7
Ref	110,6	3,0	2,7
CA	91,3	3,9	4,2
AM	99,1	2,8	2,8
GD	115,6	2,7	2,3
AT	59,8	1,7	2,9

Rc - resistência à compressão

Dv.P - desvio padrão; CV - coeficiente de variação

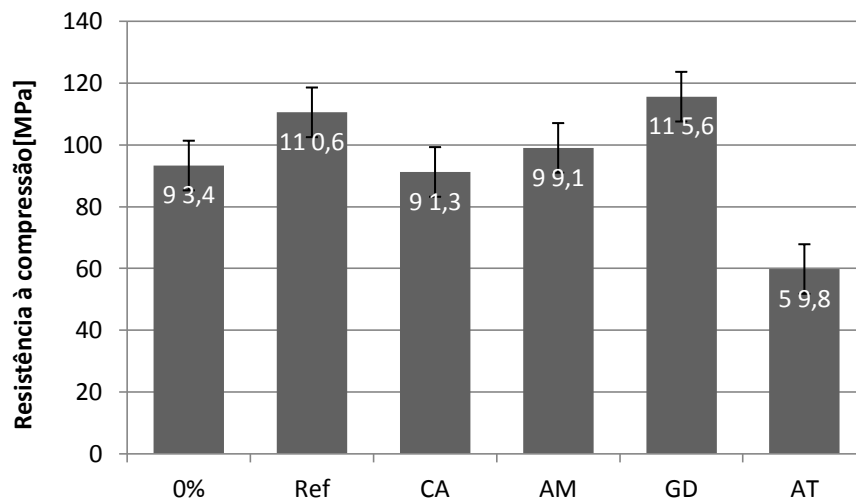


Figura 62 - Resistência à compressão dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

Observando os dados da tabela 23 e da figura 62, verifica-se que a compressão é afetada pela presença de fibras. Ao analisar os valores obtidos nos provetes de betão simples (0%) em comparação com os de referência verificou-se um aumento de resistência à compressão de aproximadamente 16%. Este aumento ocorre devido à otimização da matriz de betão com as fibras, e da boa mistura e vibração dos mesmos. Podendo-se observar aumentos de resistência, mesmo para grandes volumes de fibras, como é o caso estudado [LOPES, 2005].

Comparando os provetes sujeitos ao ambiente marítimo submerso (AM) e às condições ambientais (CA) com os de referência (Ref), verificou-se uma diminuição da resistência à compressão de 10 e 17,5%, respetivamente. O ambiente mais agressivo em termos de perda de resistência à compressão foi o das altas temperaturas (AT), onde se verificou uma diminuição da resistência à compressão de aproximadamente 45% em relação aos de referência (Ref). Os provetes sujeitos a ciclos de gelo/degelo (GD) apresentaram um aumento da capacidade de resistência à compressão, de aproximadamente 5%, em relação aos de referência (Ref). Por se tratar de um ambiente agressivo, não seria espectável obterem-se aumentos de resistência à compressão para estes. Tal observação poderá dever-se ao facto das amassaduras dos provetes em questão terem sido produzidas em dias diferentes ou de a matriz utilizada para a sua produção não ter sido afetada pela exposição a ciclos de gelo/degelo.

5.2.6. DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ULTRASSONS E MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

O ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico é efetuado, através da determinação da velocidade de propagação de ultrassons, tal como descrito em 4.4.6.. O módulo de elasticidade dinâmico relaciona-se de forma direta com a compacidade interna do betão, caracterizando-o através da rigidez. A velocidade de ultrassons é determinada pela

passagem de uma onda ultrassônica entre dois transdutores, localizados nas extremidades mais afastadas do betão, à qual se multiplica a massa volúmica aparente de cada provete, obtendo-se o parâmetro mecânico denominado de módulo de elasticidade dinâmico.

Os valores médios obtidos para as leituras de velocidade de propagação de ultrassons, encontram-se de forma organizada na tabela 24 e de forma gráfica na figura 63.

Tabela 24 - Velocidade de propagação de ultrassons dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (apresentação e interpretação)

Mistura	V. Ult [km/s]	Dv.P	CV [%]
0%	2,20	0,03	1,1
Ref	2,34	0,01	0,4
CA	2,30	0,02	1,0
AM	2,33	0,01	0,6
GD	2,36	0,01	0,4
AT	1,97	0,04	2,0

V. Ult - velocidade de propagação de ultrassons

Dv.P - desvio padrão; CV - coeficiente de variação

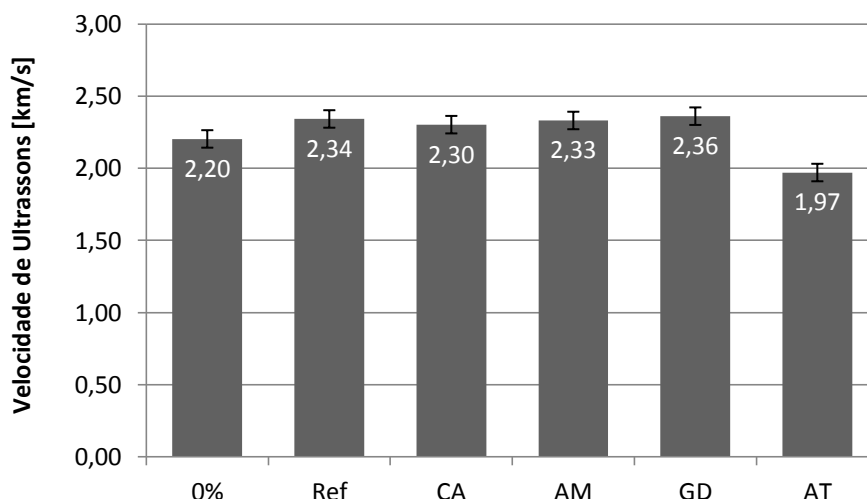


Figura 63 - Velocidade de propagação de ultrassons dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

Analisando os resultados obtidos para as leituras das velocidades de propagação de ultrassons, verificou-se que, à exceção dos provetes que foram sujeitos a altas temperaturas (AT), a velocidade de propagação mantém-se na mesma gama de valores, sendo a diferença em relação aos provetes de referência (Ref) inferior a 6%. Analisando aos

provetes que estiveram expostos a temperaturas de 800°C verificou-se uma diminuição de aproximadamente 16% em relação à referência, o que pode ser explicado pela existência de alterações macroestruturais sofridas pelo material.

Os resultados médios, obtidos na determinação do módulo de elasticidade dinâmico encontram-se apresentados de forma organizada na tabela 25 e de forma gráfica na figura 64, para os provetes sujeitos a diferentes tipos de ambientes.

Tabela 25 - Módulo de elasticidade dinâmico dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes (apresentação e interpretação)

Mistura	Ed [GPa]	Dv.P	CV [%]
0%	9,19	0,24	2,6
Ref	11,13	0,13	1,2
CA	10,25	0,30	2,9
AM	11,24	0,16	1,5
GD	11,17	0,15	1,3
AT	6,68	0,30	4,5

Ed - módulo de elasticidade dinâmico

Dv.P - desvio padrão; CV - coeficiente de variação

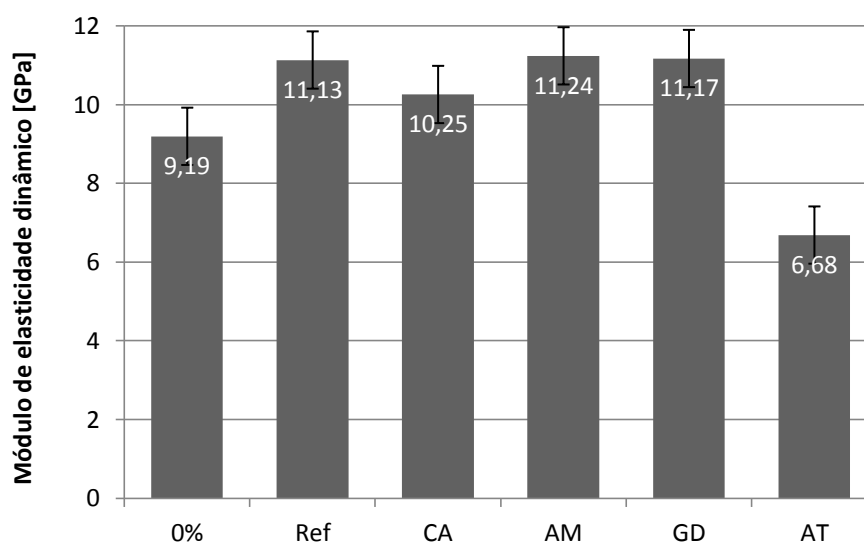


Figura 64 - Módulo de elasticidade dinâmico dos provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

Comparando os resultados obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico, constatou-se que para os provetes de betão simples (0%) existe uma diminuição em relação aos de referência, na ordem dos 17,5%, enquanto os sujeitos a condições de cura ambientais (CA) sofreram uma diminuição de aproximadamente 8%. Quando analisados os provetes sujeitos a altas temperaturas (AT), verificou-se uma diminuição de 40% em relação aos de referência (Ref). Os restantes provetes, sujeitos a ambiente marítimo (AM) e a ciclos de gelo/degelo (GD) apresentaram diferenças inferiores a 8% em relação aos de referência (Ref).

5.3. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo encontram-se analisados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados ao longo deste trabalho, recorrendo para a análise aos critérios descritos no Capítulo 5 e discriminados nas tabelas 7 e 8. Tendo como base de comparação os provetes sujeitos a condições de cura padrão (Ref), foi abordada numa primeira instância a influência da presença da lã de aço no betão e, posteriormente foram analisados os resultados obtidos nos provetes sujeitos aos ambientes agressivos descritos no Capítulo 4.5.

5.3.1. INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DE LÃ DE AÇO

A incorporação de lã de aço como reforço do betão teve como principal finalidade melhorar o desempenho mecânico, nomeadamente a resistência à tração, fazendo com que a principal fragilidade do betão seja melhorada significativamente [DIAS, 2015].

Da análise da figura 65, verificou-se que as massas volúmicas, aparente e real, dos provetes de betão simples (0%) não apresentaram diferença significativa quando comparadas com os mesmos parâmetros nos provetes de betão reforçado com lã de aço sujeito às condições de cura padrão (Ref). Ainda assim, as massas volúmicas aparente e real apresentaram uma diminuição na ordem dos 2% o que se justifica pela presença da lã de aço, material este com uma massa volúmica real significativamente superior à dos restantes constituintes. Sabe-se que a presença a fibras em compósitos de matriz cimentícia conduz, regra geral, a um aumento de porosidade e de rede de capilares. Tal deveu-se ao surgimento e aumento de novas zonas de interface caracterizadas, entre outros, pela presença de poros.

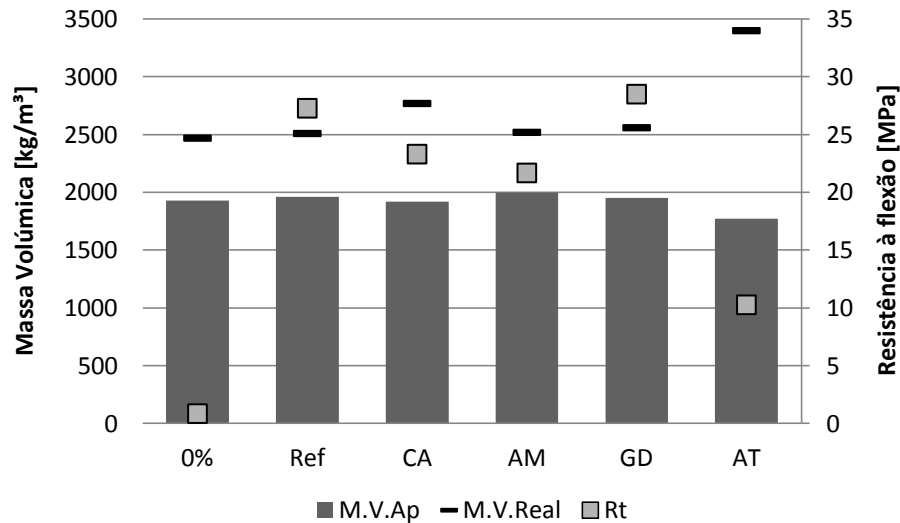


Figura 65 - Comparação da massa volúmica aparente com a massa volúmica real e a resistência à tração por flexão, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

Ainda assim, e conforme esperado, a presença da lã de aço conduziu a um aumento da resistência à tração por flexão de 3000% (figura 65). O aumento acentuado da resistência à tração por flexão é explicado pela presença e distribuição das fibras, material de reforço na matriz cimentícia, que suportam e distribuem as tensões de tração pela secção do material. A presença de fibras aumenta também a capacidade de absorção de energia até o betão atingir a carga máxima e se dar a rotura [ACI Committe 544, 1997]. A presença de fibras melhora também o comportamento à fendilhação, aumenta a resistência às cargas de impacto e à fadiga devido a ações cíclicas [BARROS, 2000]. Assim, espera-se que SIMCON-BCC apresente este comportamento, ainda que não avaliado neste trabalho.

Analisando as porosidades totais, quer do betão simples (0%), quer do SIMCON-BCC sujeito a condições de cura padrão (Ref), verificou-se que seguem a tendência das massas volúmicas aparentes obtidas na medida em que ambas as misturas apresentaram porosidades semelhantes, conforme figura 66.

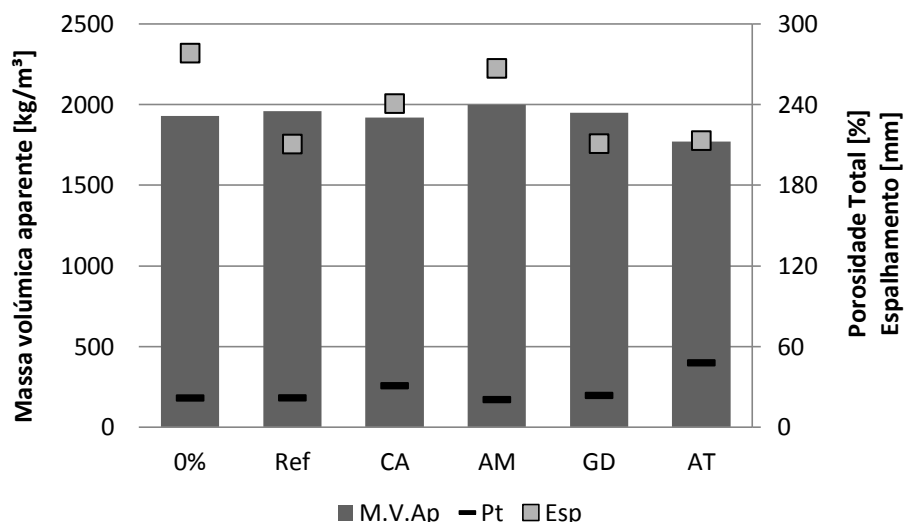


Figura 66 - Comparação da massa volúmica aparente com a porosidade total e o espalhamento, para as misturas/provetes produzidos

A deficiente infiltração da pasta cimentícia na lã de aço pode conduzir a uma diminuição do desempenho mecânico e físico na medida em que pode promover o aumento de porosidade do material.

A adequada fluidez da pasta cimentícia torna-se fundamental para que esta consiga infiltrar a lã de aço, diminuindo o aparecimento de poros. Caso não se utilize uma mistura com adequada fluidez, bem como as adequadas operações de moldagem e compactação, a porosidade das misturas vê-se aumentada, quer ao nível dos poros presentes na matriz, quer ao nível dos poros presentes nas imediações das fibras (entenda-se, os que ocorrem por efeito parede e efeito parede duplo). No caso do betão reforçado com fibras, as irregularidades físicas das fibras (diferentes formas e tamanhos) contribuem para uma melhor infiltração da pasta cimentícia e contribui para a diminuição da presença de poros no betão [QUININO, 2015].

A fluidez das misturas foi avaliada através da determinação do espalhamento, com recurso ao procedimento descrito em 4.3.1.. Constatou-se que o procedimento de moldagem e compactação obviaram as diferenças de fluidez que as misturas apresentaram. Chama-se à atenção para a mistura utilizada na produção dos provetes de SIMCON-BCC sujeita às condições de cura padrão (Ref), pois foi a que apresentou um espalhamento mais reduzido.

Também a absorção de água por capilaridade, e respetivo coeficiente de capilaridade (figura 67), não se alteraram com a presença de fibras, nem tão pouco com a diferença de fluidez que as misturas em análise apresentaram. Corrobora-se, assim, que a presença de fibras (na percentagem em estudo) e a fluidez da pasta cimentícia (nos espalhamentos observados) não influenciaram a volumetria dos poros e a sua distribuição, nem a rede capilar, devido à utilização de procedimentos de moldagem e compactação adequados.

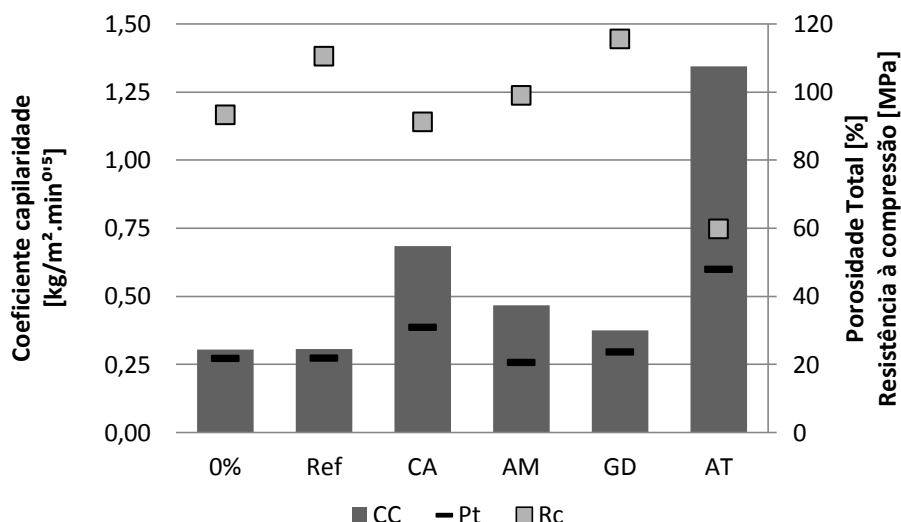


Figura 67 - Comparação do coeficiente de capilaridade com a porosidade total e a resistência à compressão, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

Espera-se que materiais da mesma natureza, e com porosidades totais e massas volúmicas aparentes semelhantes, apresentem comportamento mecânico semelhante. Verificou-se que o SIMCON-BCC sujeito a condições de cura padrão (Ref) apresentou resistência à compressão 16% superior ao do betão simples (0%), tal como apresentado na figura 67. Tal encontra-se referenciado na bibliografia de referência como sendo consequência da presença de fibras no betão [SHIMOSAKA, 2017]. A presença de fibras no betão, sempre que se verifique a adequada fluidez da mistura e as adequadas condições de compactação, conduz a uma quantidade de poros semelhante e a um aumento ligeiro da resistência à compressão [LOPES, 2005].

A presença de fibras conduz a um aumento da ductilidade do betão reforçado sempre que as mesmas se encontrem uniformemente distribuídas na secção transversal do elemento [GOMES, 2010].

Analisando a figura 68, verificou-se que o módulo de elasticidade e a resistência à compressão apresentaram a mesma tendência, como já referido, devido à adequada fluidez das misturas, às adequadas condições de moldagem e compactação mas principalmente devido à presença da lâ de aço. Isto veio reforçar a ideia já mencionada, que a tendência verificada nas massas volúmicas aparentes é válida para as resistências à compressão e módulos de elasticidade, sendo que materiais com massas volúmicas mais elevadas apresentam resistências à compressão e módulos de elasticidade mais elevados.

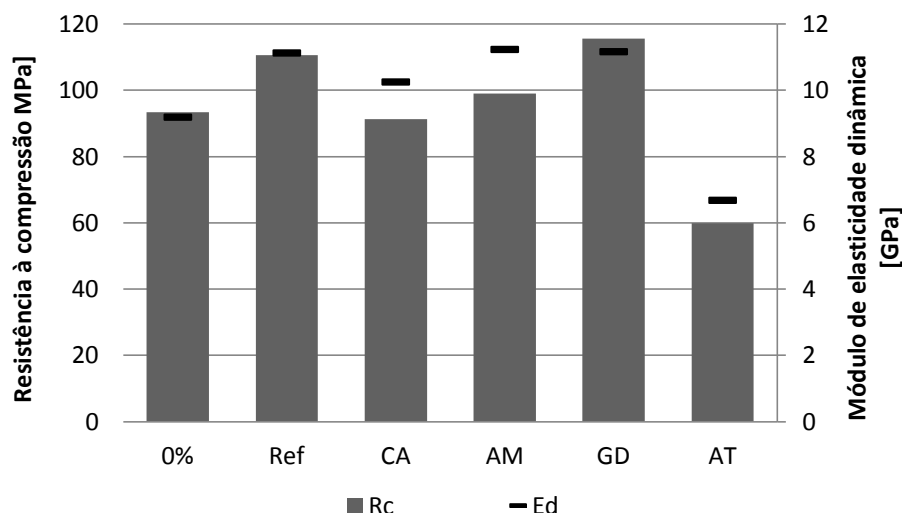


Figura 68 - Comparação da resistência à compressão com o módulo de elasticidade dinâmico, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

Sabe-se que a resistência à compressão do betão aumenta tanto quanto possível com o aumento da resistência da matriz cimentícia, enquanto o módulo de elasticidade aumenta com a presença das fibras [ALMEIDA, 2012]. A relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do betão pode ser explicado pelo efeito de rigidez das fibras sobre a distribuição das tensões no betão.

A matriz cimentícia apresentou comportamento frágil enquanto as fibras de aço apresentaram comportamento dúctil e, desta forma, o compósito produzido apresentou uma maior deformação antes de atingir a rotura. Mais uma vez se recorda que a presença de fibras no betão aumenta a resistência à compressão e à flexão, bem como o módulo de elasticidade [SHIMOSAKA, 2017].

Relembra-se que o módulo de elasticidade aqui apresentado diz respeito à determinação através da velocidade de propagação de ultrassons. Assim, espera-se que materiais que apresentaram frequência ressonante mais baixa tenham módulo de elasticidade mais elevado, conforme o descrito em 4.4.6..

Com base na figura 69, constatou-se que a presença de lâ de aço conduziu a uma diminuição da frequência da onda ultrassónica, e consequente ao aumento da velocidade, resultando num incremento do módulo de elasticidade dinâmico. Ainda que o SIMCON-BCC sujeito a condições de cura padrão (Ref) tenha apresentado porosidade total igual à do betão simples (0%), apresentou massa volúmica aparente ligeiramente superior como resultado da introdução de um constituinte com densidade mais elevada do que os restantes. Assim, verificou-se um ligeiro aumento do módulo de elasticidade devido à presença das fibras. Segundo Bosco em 2015, a velocidade média de propagação de ultrassons em fibras de aço é de 4,6km/s e, de acordo com Almeida et al em 2012, a velocidade média de propagação de ultrassons em caldas de cal hidráulica com porosidades na ordem dos 55% rondam os 1,6km/s. Betões com porosidades mais baixas dos que apresentadas nas cais estudadas por Almeida et al em 2012 apresentaram velocidades de

propagação de ultrassons mais elevadas, ainda assim, inferiores às velocidades verificadas por Bosco em 2015 nas fibras de aço. É de esperar que a presença da lâ de aço faça aumentar a velocidade de propagação de ultrassons (registou-se um aumento de 6%) e consequentemente o módulo de elasticidade dinâmica, conforme figura 69.

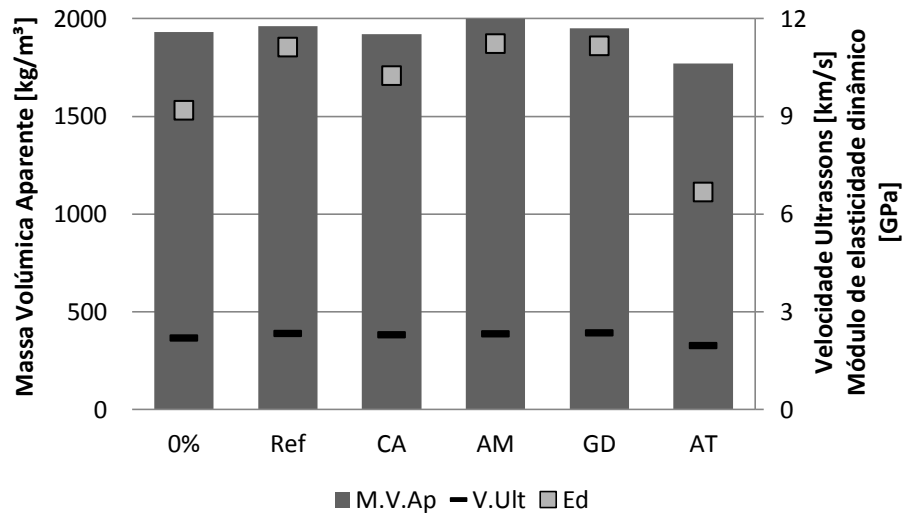


Figura 69 - Comparação da massa volúmica aparente com a velocidade de propagação de ultrassons e o módulo de elasticidade dinâmica, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

A adição de fibras de aço na matriz cimentícia potencia, como espectável, a resistência à tração e a inclusão do elemento metálico não afetou a percentagem de vazios presentes no material, muito devido à fluidez e compactação adequada na infiltração da calda de cimento na lâ de aço.

5.3.2. CURA EM CONDIÇÕES AMBIENTAIS CORRENTES

O processo de cura para betões, descrito na norma NP EN 12390-2:2009 [IPQ, 2009a], define que a exposição do betão deve ser efetuada de forma otimizada após produção e desmoldagem, submetendo o betão a uma gama de temperaturas de $20 \pm 5^\circ\text{C}$ e a condições de humidade relativa não inferiores a 95%. Relembra-se que o estado de elevada saturação na cura do betão evita a evaporação da água de amassadura até que esta seja utilizada na hidratação do cimento. A cura mencionada, e tida como referência, ao ser respeitada, diminui o aparecimento de vazios, minimizando desta forma as desvantagens que advêm de um betão poroso [FERREIRA, 2000].

Os provetes sujeitos a condições de cura padrão (Ref) e os obtidos através do processo de cura sujeita a condições ambientais correntes (CA) foram produzidos com igual composição e procedimento de produção, diferenciando-se somente no seu processo de cura. Os provetes CA foram submetidos às condições ambientais descritas em 4.5.2.. Embora as temperaturas ocorridas no período de cura tenham sido dentro dos parâmetros da norma NP EN 12390-2:2009 [IPQ, 2009a], a humidade relativa esteve abaixo do recomendado, tendo-se registado valor médio de $60 \pm 10\%$.

Através da figura 70, observou-se que o espalhamento da mistura CA foi ligeiramente superior ao da Ref em aproximadamente 15%, fator que influenciou os resultados obtidos para as massas volúmicas aparente no estado fresco, que apresentaram a mesma tendência. O comportamento referido vai de encontro à hipótese de que a maior fluidez da pasta cimentícia CA se deveu à ação do adjuvante e não da quantidade de água presente no compósito, refletindo-se no aumento acentuado da massa volúmica aparente no estado fresco.

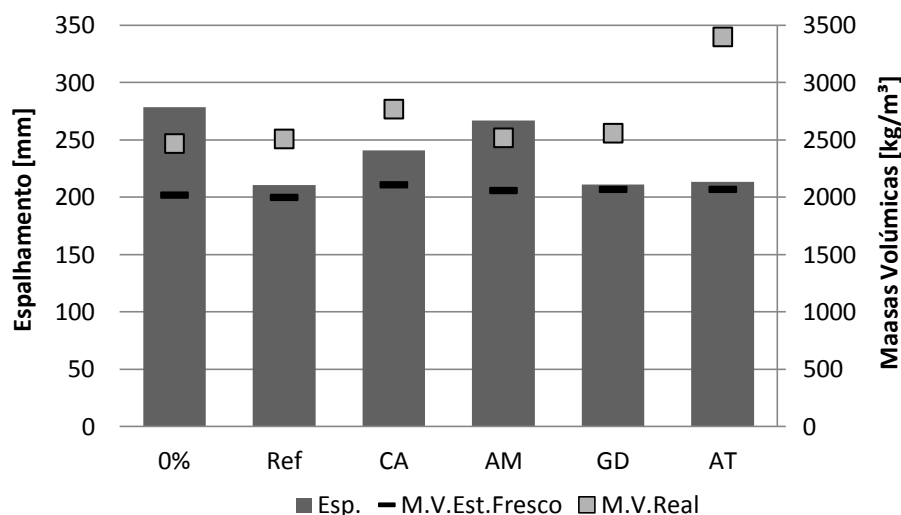


Figura 70 - Comparação do espalhamento com a massa volúmica aparente no estado fresco e a massa volúmica real, para amassaduras/provetes produzidos

Na mistura CA, observou-se que o espalhamento, a massa volúmica aparente no estado fresco e a massa volúmica real foram superiores aos da mistura Ref (figura 70).

O facto da massa volúmica real, que caracteriza a relação entre a massa dos provetes e o seu volume específico, ter sido acentuadamente superior nos provetes CA significa que estes apresentaram uma estrutura sólida mais densa, resultado de uma melhor atuação e combinação dos constituintes do material em estudo. Analisando o aumento acentuado da massa volúmica real e a diferença ligeira entre os resultados das massas volúmicas aparentes no estado endurecido, de aproximadamente 2%, concluiu-se que, a porosidade total é também significativamente superior (figura 71). Tal reforça o princípio de massa volúmica aparente em que volumes unitários de material com igual massa volúmica aparente, apresentarem massas volúmicas reais diferentes, tal diferença deverá ser acompanhada pela porosidade.

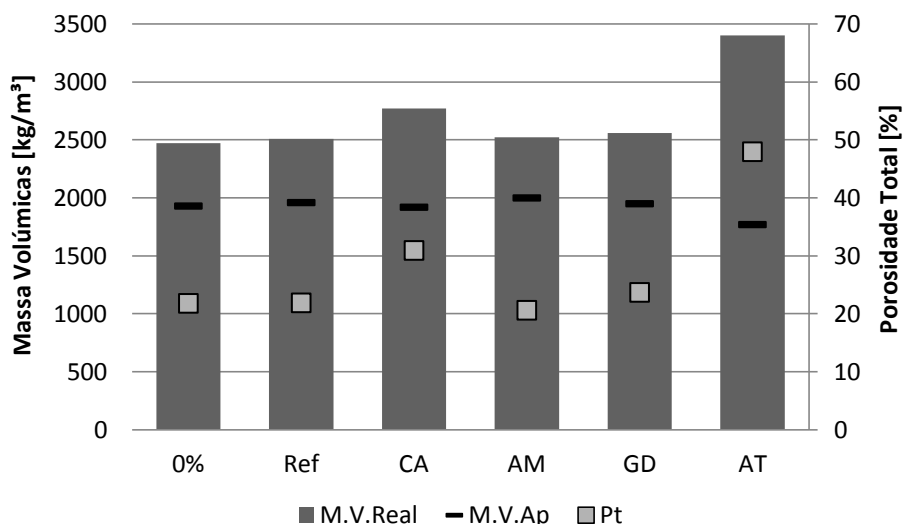


Figura 71 - Comparação da massa volúmica real com a massa volúmica aparente e a porosidade total, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

Os ensaios que caracterizam a constituição interna dos provetes foram elucidativos da importância do processo de cura do betão (figura 72). Nos provetes submetidos a cura em condições ambientais (CA) verificaram-se aumentos acentuados de porosidade, na ordem dos 40%, em relação aos provetes de referência (Ref). À semelhança da porosidade, também a rede capilar do betão foi afetada com o processo de cura. O coeficiente de capilaridade, obtido através do ensaio de absorção de água por capilaridade, registou, para os provetes CA, um aumento de 125% em relação aos de referência (Ref) (figura 72). Tal como seria de esperar, as condições de humidade relativa permitiram nos provetes CA uma migração e posterior evaporação da água de amassadura, potencializando o aumento de poros e, consequentemente, da rede de capilares.

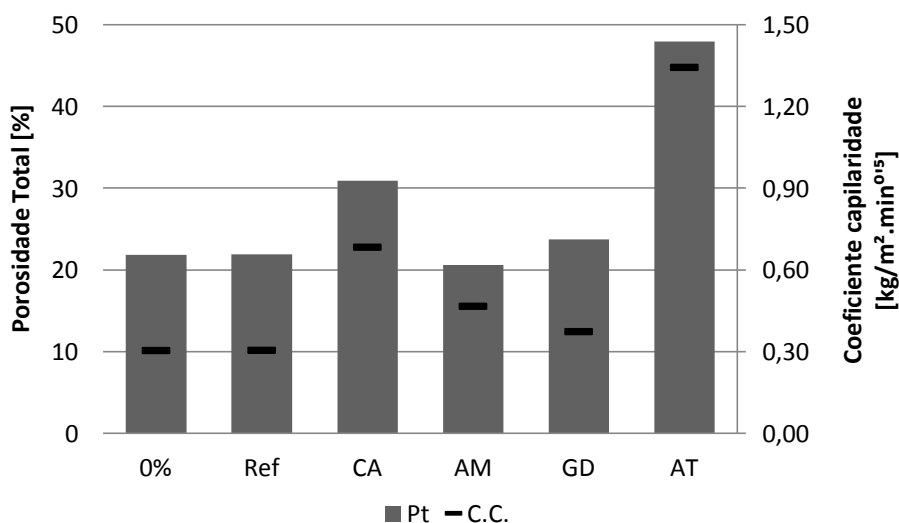


Figura 72 - Comparação da porosidade total com o coeficiente de capilaridade, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

Ao manter a humidade relativa acima dos 95% durante o processo de cura do betão, as propriedades mecânicas do betão são potenciadas ao máximo, na medida em que se evita a evaporação da água livre do interior do betão (reações de hidratação do cimento) e se minimiza o valor e a duração da retração de secagem [COUTINHO, 1994].

Por outro lado, se o teor de humidade relativa não for respeitado, e se verificarem humidades inferiores a 80%, o betão sofrerá retração, dando origem ao aparecimento de poros e fissuras. A retração depende de fatores para além da humidade, nomeadamente a quantidade e propriedades dos agregados utilizados, a dimensão e forma do elemento de betão, dando-se ênfase ao método de cura e ao grau de hidratação, como referido anteriormente [BARBOSA, 2013].

O método de cura teve uma influência acrescida na estrutura interna do betão, demonstrada através da quantidade de poros e que, como consequência direta, afetou a resistência à compressão, diminuindo ligeiramente nos provetes sujeitos à cura mais desfavorável (CA) em 17% relativamente à referência (Ref). A ligação das fibras com a matriz cimentícia foi afetada, evidenciando-se a sensibilidade ao tipo de cura preconizado por se terem obtido valores inferiores na resistência à tração por flexão, de aproximadamente 15% nos provetes CA em relação aos de referência (Ref), como apresentado na figura 73.

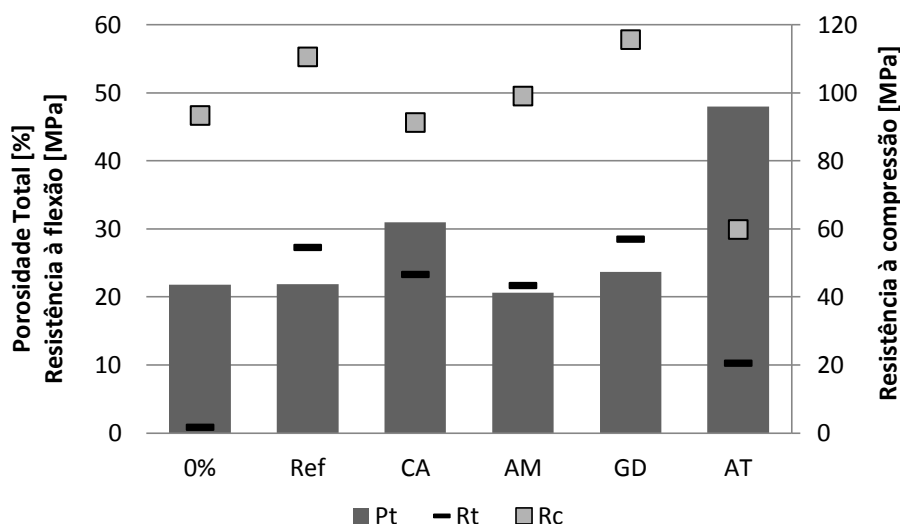


Figura 73 - Comparação da porosidade total com a resistência à flexão e a resistência à compressão, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

O aumento das resistências mecânicas do betão continua a desenvolver-se desde que o betão se mantenha húmido e que haja espaço suficiente para que se formem os produtos da hidratação. Quando a humidade relativa desce dos 80%, o betão deixa de desenvolver os processos de hidratação e por conseguinte, de desenvolver resistência mecânica. As resistências mecânicas são também influenciadas pela relação A/L e pela duração e condições de cura, afetando igualmente as ligações entre o betão e os constituintes de aço [BARBOSA, 2013].

Relativamente à velocidade de propagação de ultrassons verificou-se (figura 74) o aumento na ordem dos 2% nos provetes CA, associado ao aumento da porosidade e consequência das condições de cura ambiental, tendo afetado de forma significativa a quantidade de vazios presentes no betão.

Os dados presentes na figura 74 reforçam a ideia de que o tipo de cura tem influência na estrutura interna do betão através do aparecimento de vazios. O equilíbrio de humidade entre a atmosfera e o betão evitou a evaporação de água e por consequente a retração do mesmo [COUTINHO, 1994]. O aumento da quantidade de poros teve consequência na absorção das ondas ultrassónicas do ensaio de ultrassons, diminuindo o módulo de elasticidade dinâmico [ALMEIDA ET AL, 2012].

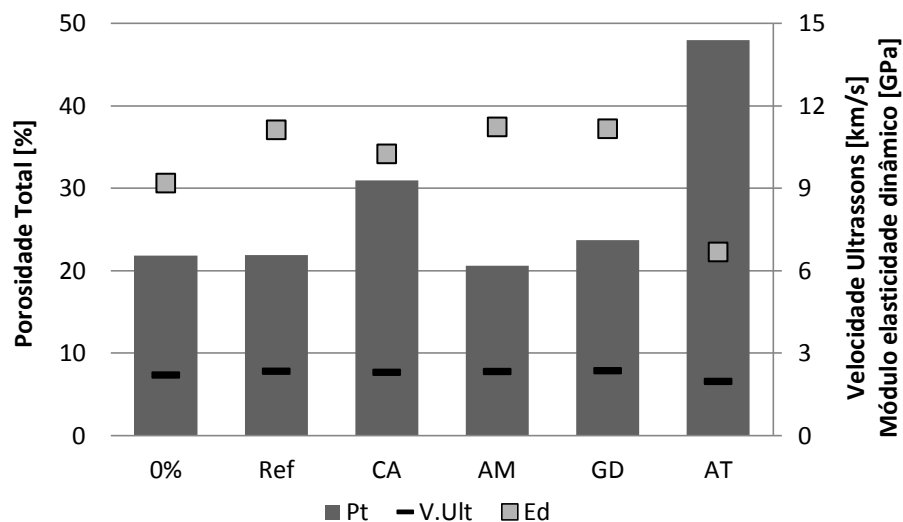


Figura 74 - Comparação da porosidade total com a velocidade de propagação de ultrassons e o módulo de elasticidade dinâmico, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

A qualidade do betão endurecido foi fortemente afetada pelo processo de cura a que foi sujeito, reforçando que a uma cura adequada, caracterizada pela hidratação constante, promove betões menos porosos [QUININO, 2015].

O processo de cura adotado diferenciou-se do método de referência pela diminuição da humidade relativa verificada no meio ambiente, que surtiu num aumento da quantidade de vazios (poros e rede capilar) e diminuição das resistências mecânicas do betão.

5.3.3. CURA EM AMBIENTE MARÍTIMO SUBMERSO

A cura efetuada em ambiente marítimo (AM), tendo sido os provetes submersos em água salgada, tal como descrito em 4.5.3., provoca corrosão e danos nos elementos metálicos presentes no betão. Os sais dissolvidos na água, denominados de iões cloreto (Cl^-), reagem e desgastam química e fisicamente os componentes metálicos no betão, ricos em Ferro (Fe) [LIMA e MORELLI, 2004].

Admitindo a corrosão como principal fator de desgaste do betão reforçado com materiais metálicos submerso em água marítima, importa compreender a forma como se dá a absorção de água no betão. A porosidade, como medida de proporção entre o volume de vazios e o volume total de betão diferencia-se da permeabilidade, que compreende a maior ou menor facilidade com que o material se deixa atravessar, ou penetrar, por fluidos. A interligação dos poros em grande escala dá origem a uma permeabilidade elevada, denominada por rede capilar, que é independente da percentagem de poros presentes no betão [KULISCH, 2011].

Na figura 75, observou-se que os resultados das massas volúmicas aparentes dos provetes AM aumentaram ligeiramente em relação à referência (Ref). Já na análise das porosidades totais verificaram-se valores semelhantes, mostrando que os provetes não foram afetados pelos tipos de cura preconizados.

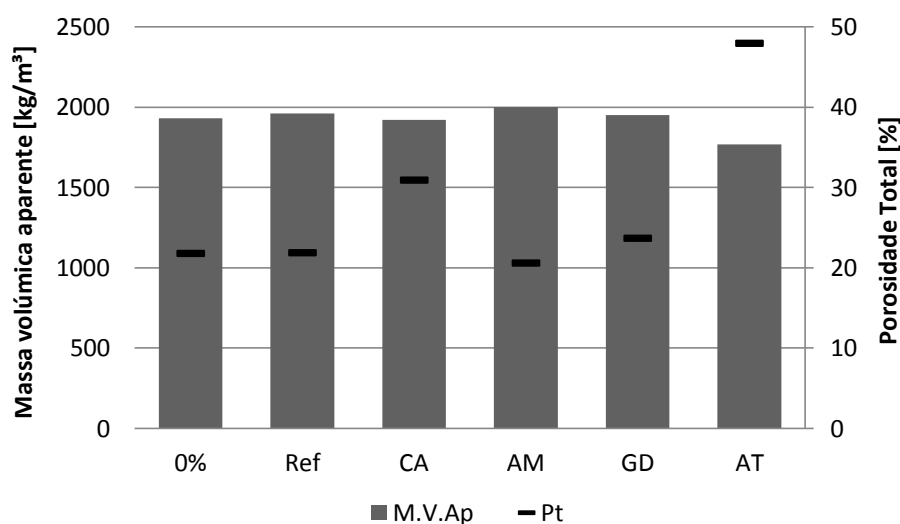


Figura 75 - Comparação da massa volúmica aparente com a porosidade total, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

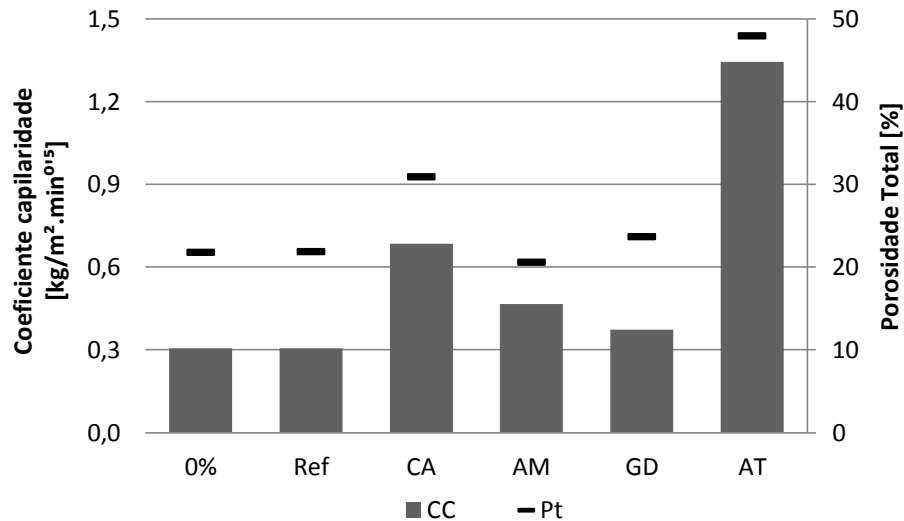


Figura 76 - Comparação do coeficiente de capilaridade com a porosidade total, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

Verificou-se na figura 76 que os provetes AM, apesar da semelhança das porosidades totais, obtiveram um aumento acentuado do coeficiente de capilaridade (CC) em relação à referência (Ref). O aumento do CC, de aproximadamente 53%, demonstra a existência de uma grande rede de capilares após cura em água do mar.

Conforme já referido, os provetes AM apresentaram uma rede de capilar superior em relação à referência (Ref) que, conforme observado na figura 77, não surtiram diferenças significativas no módulo de elasticidade, tendo-se verificado que ao nível da estrutura interna somente a microestrutura foi afetada.

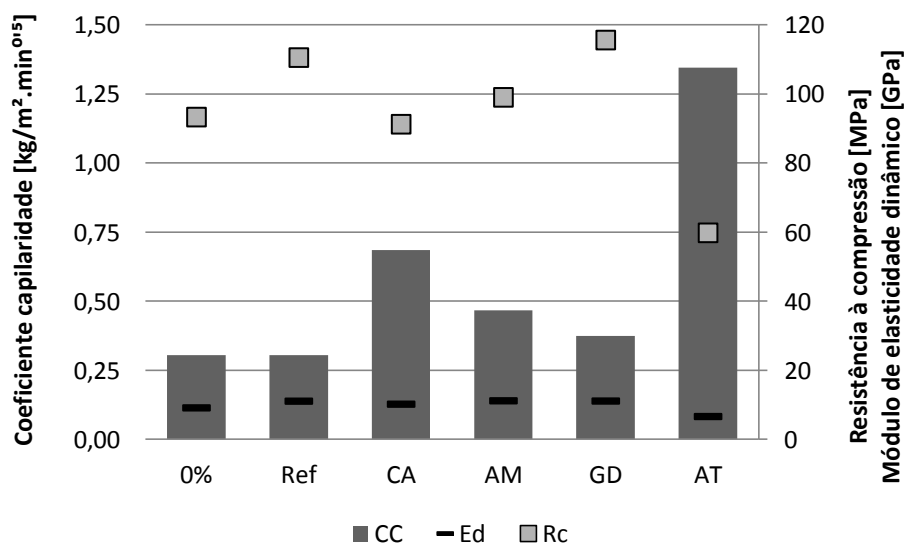


Figura 77 - Comparação da resistência à compressão com o módulo de elasticidade dinâmico e o coeficiente de capilaridade, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

Quando analisadas as resistências à compressão, os provetes AM apresentaram valores inferiores em relação à referência (Ref), de aproximadamente 10%. A diminuição da resistência à compressão é justificada pela afetação da microestrutura e da rede capilar dos provetes AM, que sofreram um aumento acentuado, como referido anteriormente (figura 77).

Os íões cloreto, principal componente químico da água do mar, ao serem absorvidos pelo betão através dos poros e rede de capilares, propiciam o contacto entre os sais marítimos e os elementos metálicos, que oxidam e enfraquecem mecanicamente [DOTTO, 2006]. Na figura 78 observou-se que o módulo de elasticidade dinâmico e a massa volúmica real foram semelhantes para os provetes em estudo. A igualdade referida, em conjunto com a diminuição significativa da resistência à flexão levam à conclusão de que as fibras foram afetadas através da exposição do betão ao ambiente marítimo.

Observou-se na figura 78 que, em relação aos provetes sujeitos a condições de cura padrão (Ref), os resultados obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico e para a massa volúmica real foram semelhantes aos provetes sujeitos a cura em ambiente marítimo (AM), reforçando a ideia/conceito de que ambos os provetes (AM e Ref) apresentaram a mesma densidade e compacidade, no entanto a resistência à tração foi afetada de forma significativa, mostrando que as fibras foram afetadas no processo de cura sujeito a componentes presentes na água do mar.

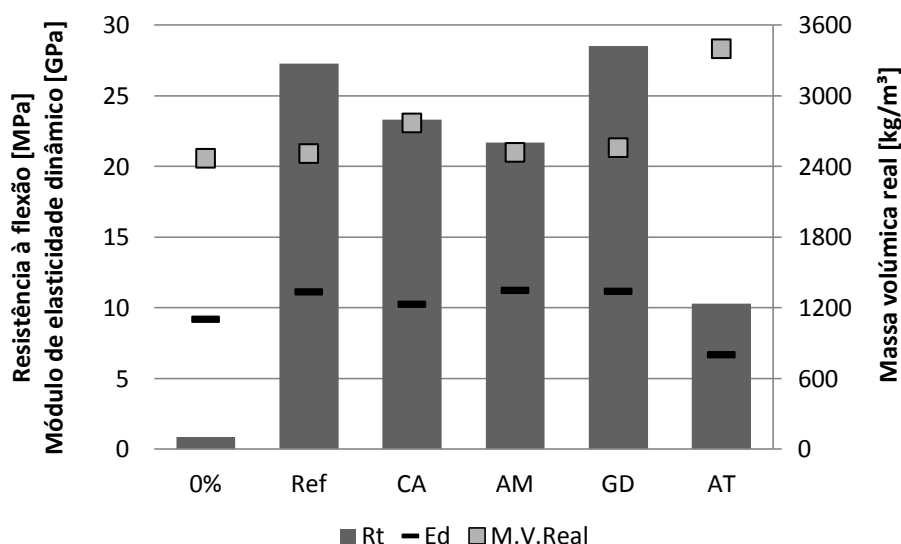


Figura 78 - Comparação da resistência à flexão com o módulo de elasticidade dinâmico e a massa volúmica real, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

O ambiente marítimo torna-se agressivo para betão reforçado com lâ de aço, pela corrosão que as fibras sofrem através do contacto com os sais presentes na água marítima. Outro fator a considerar no betão submerso em água do mar, é a garantia de um recobrimento mínimo, garantido que os elementos de reforço metálico não entram em contacto direto com os agentes agressivos, estando a durabilidade do betão inteiramente relacionado com uma execução cuidadosa [LIMA e MORELLI, 2004].

O processo de cura adotado diferenciou-se do método de referência pela imersão dos provetes em água do mar, composta por sais marítimos, que afetou de forma acentuada a rede capilar e oxidou as fibras de aço, diminuindo significativamente a resistência à tração.

5.3.4. EXPOSIÇÃO A CICLOS DE GELO/DEGELO

A durabilidade do betão aos ciclos gelo/degele encontra-se relacionada com a capacidade e velocidade de absorção de água que o betão apresenta, fazendo da estrutura porosa o fator mais condicionantes para este tipo de ambiente agressivo. Quando o betão se encontra completamente saturado e são atingidas temperaturas negativas, a água presente no betão congela e passa do estado líquido para o sólido, aumentando de volume. A expansão do volume de água provoca tensões nas paredes dos poros e redes capilares, exercendo pressões que podem aumentar o volume dos vazios, dando origem a microfissuração. No caso do betão não se encontrar completamente saturado, os problemas que podem surgir são minimizados, uma vez que o volume de água presente no betão é inferior ao volume de poros [CUNHA, 2014].

Nos provetes sujeitos a ciclos de gelo/degele (GD) verificou-se que o módulo de elasticidade dinâmico e a massa volúmica aparente (figura 79) foram semelhantes aos obtidos nos provetes sujeitos somente a condições de cura padrão (Ref). Os procedimentos de ensaio adotados no presente trabalho, descritos em 4.5.4., foram de encontro aos estudos efetuados por Girskas em 2015 e de Skripkiūnas et al em 2013, onde se concluiu que os ciclos gelo/degele preconizados não afetaram, de forma significativa, os provetes produzidos.

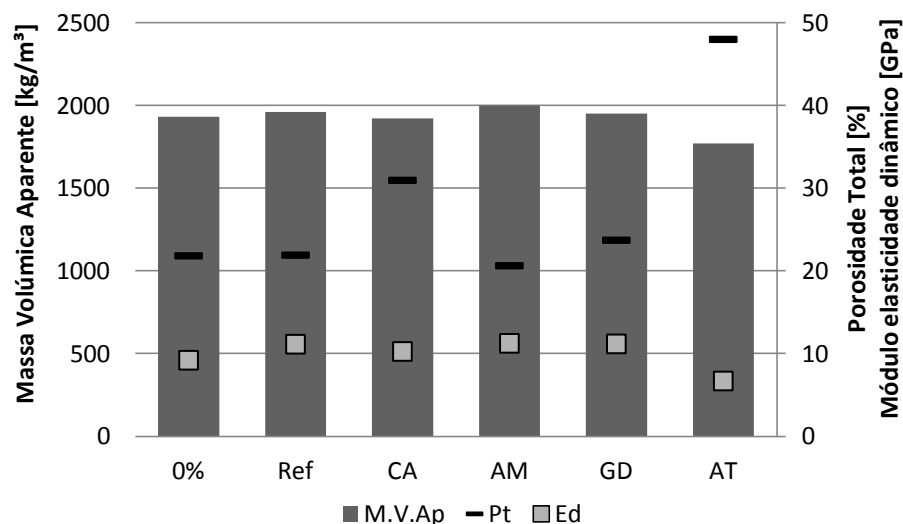


Figura 79 - Comparação da massa volúmica aparente com a porosidade total e o módulo de elasticidade dinâmico, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

Na figura 79 observou-se que o fenómeno destrutivo associado às pressões causadas no interior do betão pela mudança de estado físico da água devido à variação de temperatura

do ensaio, foi minimizado através da mistura e do processo de cura efetuados nos provetes GD.

Tendo-se obtido uma mistura pouco permeável devido às adequadas operações de compactação, fluidez da pasta cimentícia e condições de cura, os vazios associados às zonas de interface matriz/fibras foram minimizados. O resultado da baixa permeabilidade resultou numa quantidade de poros semelhante considerando os provetes sujeitos a ciclos de gelo/degelo (GD) e os de referência (Ref), tal como verificado por Lima e Libório em 2008.

Relembra-se que os provetes GD e Ref foram produzidos e curados de forma idêntica, diferenciando-se a exposição a ciclos de gelo/degelo nos provetes GD. Através da figura 80, as porosidades demonstram que a estrutura de vazios dos provetes não foi afetada de forma significativa, mesmo após exposição a ciclos de gelo/degelo. No entanto, verificou-se que quando comparados os coeficientes de capilaridade se obtiveram diferenças significativas, tendo os provetes GD apresentado uma maior absorção de água por capilaridade, em aproximadamente 22%, devido à expansão da água que congelou e aumentou as interligações dos poros.

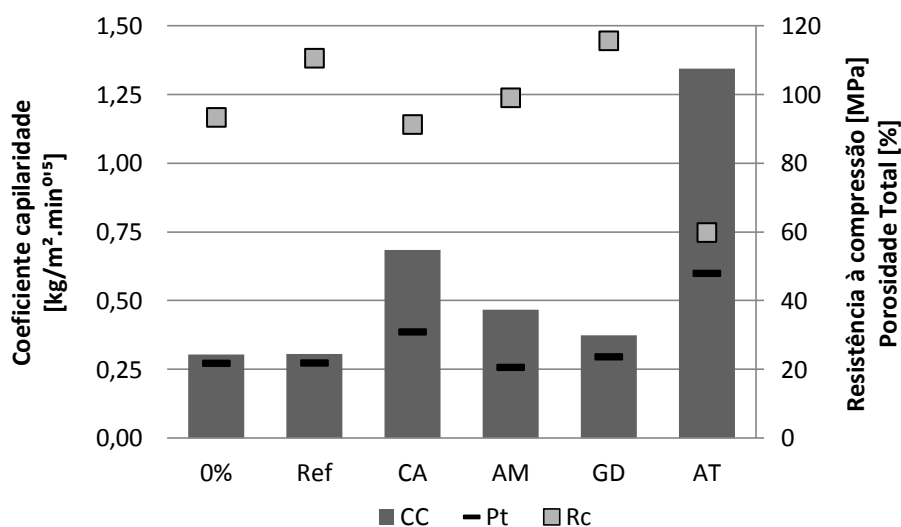


Figura 80 - Comparação da resistência à compressão com a porosidade total e o coeficiente de capilaridade, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

O aumento da rede capilar nos provetes GD e da quantidade de poros não foi refletido na resistência à compressão, não se tendo verificado diminuição da característica mecânica (figura 80). A semelhança de resistência mecânica das misturas GD e Ref observadas justifica-se pela natureza do material, designadamente pela matriz cimentícia, que não foi grandemente afetada pelos ciclos gelo/degelo conforme ensaio efetuado.

Tal como observado para a resistência à compressão, também a exposição referida a ciclos de gelo/degelo não afetou a resistência à tração por flexão, conforme figura 81.

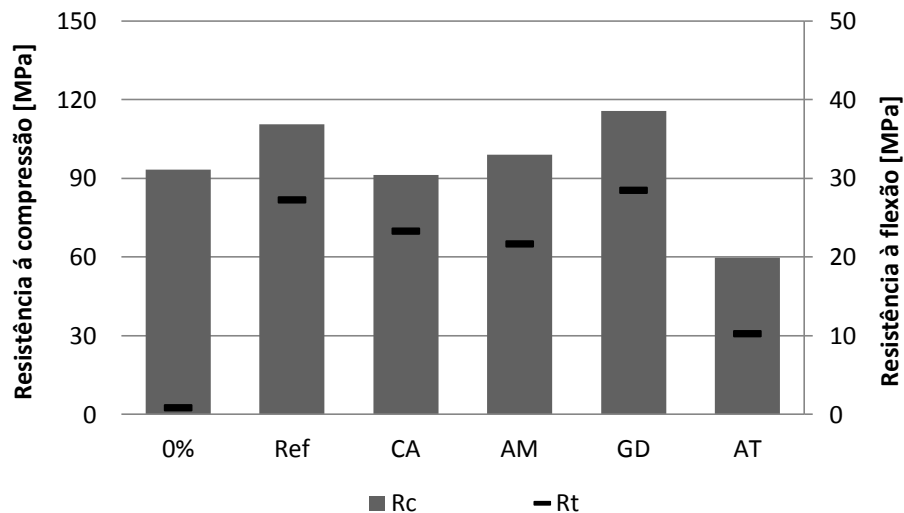


Figura 81 - Comparação da resistência à compressão com a resistência à flexão, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

Concluiu-se então que o betão, à semelhança do verificado por Silva em 2004, produzido e curado com os mesmos procedimentos, não foi afetado ao nível das resistências mecânicas pela exposição a ciclos de gelo/degelo, nas condições apresentadas no Capítulo 4.5.4.. As poucas diferenças verificadas nas propriedades dos provetes atribuem-se ao movimento da água na rede capilar, consequência do congelamento/descongelamento da água presente no betão, recorrentes da amplitude de temperaturas dos ciclos, sem nunca colocar em causa o desempenho da matriz cimentícia reforçada [LIMA e LIBORIO 2008].

Relativamente aos ensaios de durabilidade abordados por Cunha em 2014, concluiu-se que os betões à base de cimento CEM I, como o utilizado neste trabalho, são os que possuem uma menor sensibilidade às ações dos ciclos de gelo/degelo, apresentando valores de porosidade inferiores aos restantes e tendo consequentemente um melhor comportamento mecânico.

Richardson et al em 2011, baseado no estudo de Jacobsen et al em 1996, referem que para relações A/L de 0,3, semelhante à utilizada na produção dos provetes em estudo, existe pouca formação de gelo no interior do betão, e nestas condições, menos de metade da água absorvida é congelada a temperaturas de -20°C, não provocando danos expressivos no betão [RAMOS, 2014].

A exposição dos provetes a ciclos gelo/degelo não sortiu qualquer efeito negativo nas resistências mecânicas do betão produzido. Somente a rede de capilares foi afetada de forma significativa, decorrente das variações físicas da água ao congelar/descongelar no interior do betão.

5.3.5. EXPOSIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS

A exposição do betão a temperaturas elevadas provoca alterações na composição química e na estrutura física do mesmo através do aparecimento de fissuras e da diminuição das resistências mecânicas [COSTA, 2012].

A matriz densificada do betão produzido tende a contribuir para o aumento da sensibilidade do material a condições térmicas extremas, tais como as que se verificaram na exposição dos provetes a altas temperaturas, conforme Capítulo 4.5.5.. A justificação para este comportamento do betão deve-se ao aumento de pressão que ocorre nos vazios, decorrente da evaporação da água presente na matriz cimentícia, associada às tensões geradas pelos gradientes de deformações térmicas [LIMA ET AL, 2004].

O efeito da temperatura fez-se sentir na compacidade do betão, onde se observou, através da figura 82, que a velocidade de propagação de ultrassons e o módulo de elasticidade dinâmico dos provetes expostos a temperaturas de 800°C (AT) foram significativamente afetados, tendo diminuído 16% e 40% respetivamente, em relação à referência (Ref) [LAU, 2003].

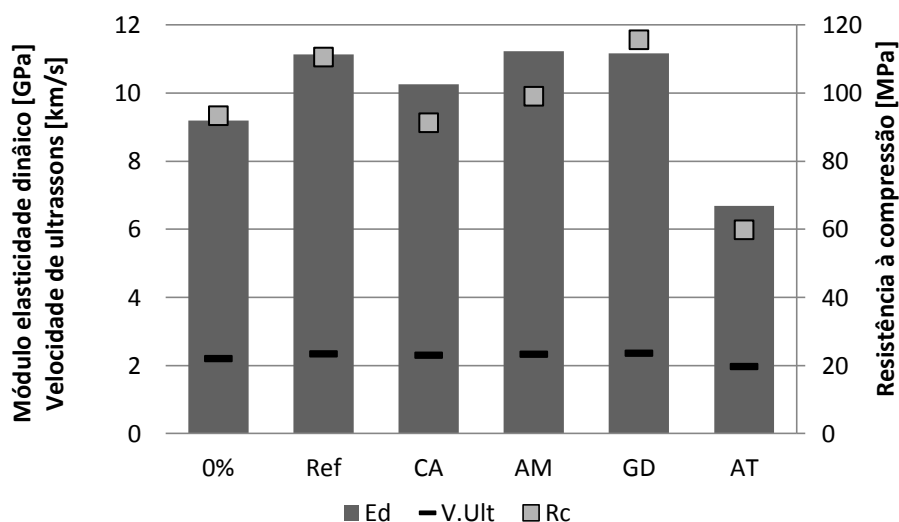


Figura 82 - Comparação do módulo de elasticidade dinâmico com a velocidade de propagação de ultrassons e a resistência à compressão, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

Com a diminuição da compacidade do betão, como referido anteriormente, também a resistência à compressão foi afetada, tendo-se verificado, através da análise da figura 82, uma diminuição significativa dos valores médios obtidos, podendo-se atingir uma perda da resistência quase total quando atingidas temperaturas acima dos 800°C [SANTOS E RODRIGUES, 2011].

A 800°C, os provetes (AT) demonstraram uma diminuição da resistência à compressão, de aproximadamente 45%, tal como demonstrado na figura 83, admitindo-se que este comportamento pode advir das expansões sofridas pela lã de aço perante o aumento da temperatura. As ligações da matriz cimentícia e as fibras foram prejudicadas, dando origem

a tensões e desgaste adicional no material, observado através da diminuição da massa volúmica aparente (figura 83) [LIMA ET AL, 2004].

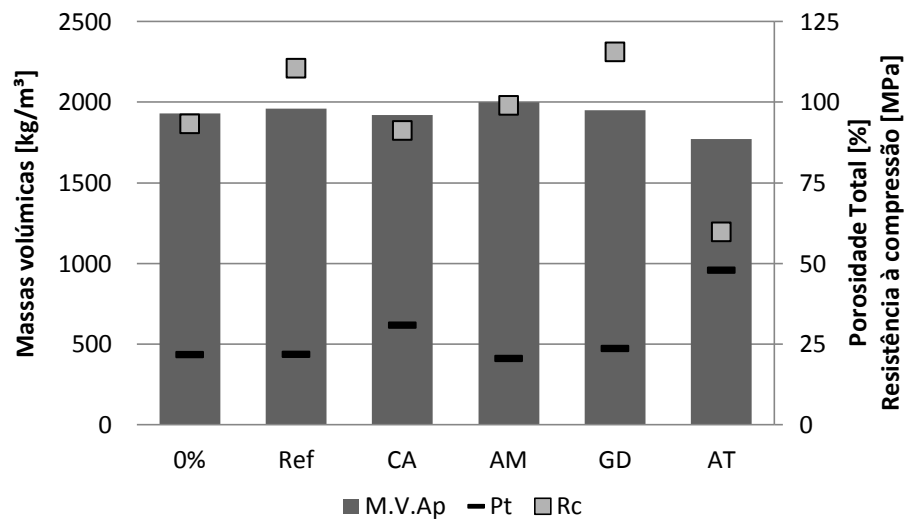


Figura 83 - Comparação da massa volúmica aparente com a porosidade total e a resistência à compressão, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

Através da análise da figura 84 verificou-se que os provetes sujeitos a temperaturas de 800°C (AT) apresentaram um aumento acentuado da quantidade de poros, tal como verificado por Lau em 2003. O incremento no volume de poros de 120% refletiu-se, numa maior velocidade de absorção de água por capilaridade, em relação à referência (Ref), em aproximadamente 340%.

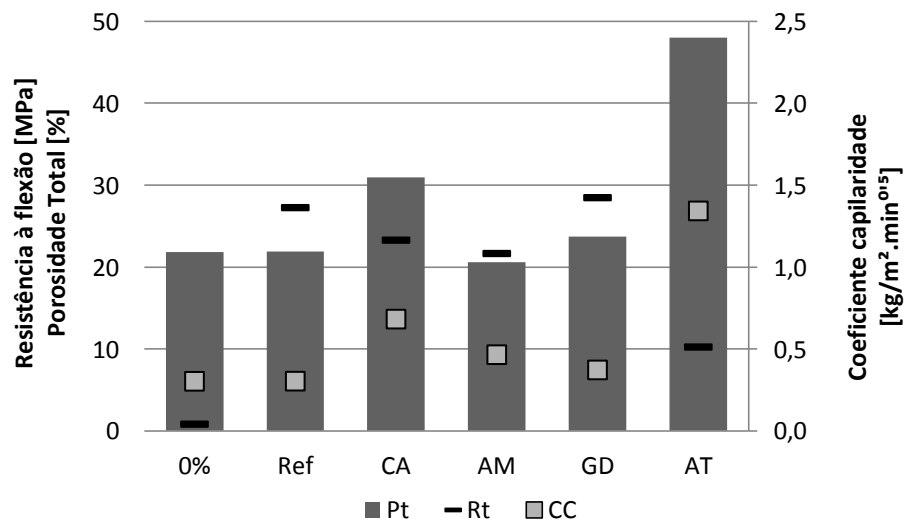


Figura 84 - Comparação da porosidade total com a resistência à flexão e o coeficiente de capilaridade, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

A diminuição da resistência à flexão deve-se à dilatação das fibras de aço e da decomposição da matriz cimentícia. Na figura 84 observou-se a perda acentuada de resistência à flexão dos provetes AT em relação ao de referência (Ref), causada pelo enfraquecimento da ligação entre as fibras e a matriz cimentícia. De acordo com Lau em 2003, a redução da resistência da pasta de cimento endurecida deve-se ao aumento acentuado de poros, pela desagregação parcial dos hidratos de silicato de cálcio e pela transformação química devido a reações hidrotermais e pelo desenvolvimento de fissuras.

A massa volúmica real, medida representativa da massa volúmica real dos componentes sólidos, apresentou um aumento significativo nos provetes sujeitos a altas temperaturas (AT) em relação à referência (Ref) (figura 85). O argumento de que a matriz foi afetada e volatilizou é validado, prevalecendo a massa volúmica da lã de aço, que é superior à dos restantes constituintes do SIMCON-BCC, como descrito anteriormente [LAU, 2003].

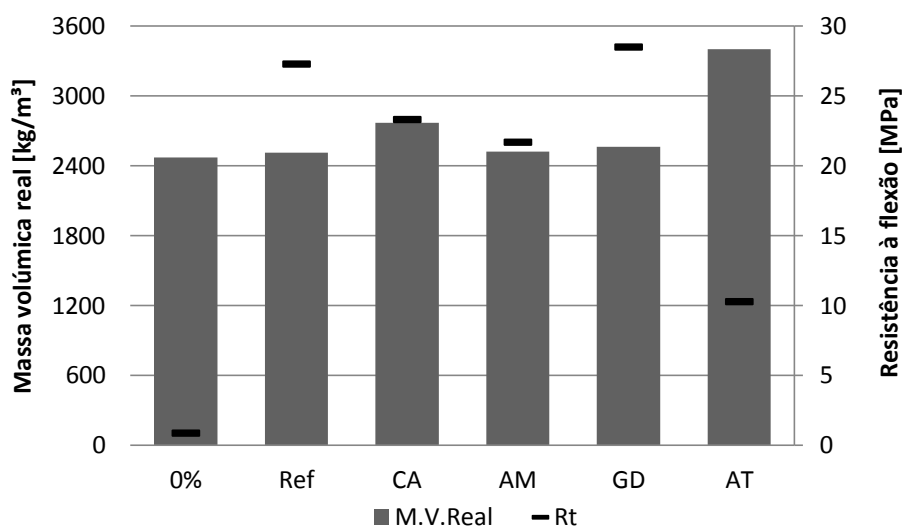


Figura 85 - Comparação da massa volúmica real com a resistência à flexão, para os provetes depois de sujeitos a diferentes tipos de ambientes

O efeito das pressões e consequentes reações expansivas que ocorreram com o aumento da temperatura no interior do betão, não se restringiram a alterações físicas, ocorrendo também transformações químicas importantes nos componentes responsáveis pelas características do betão quando endurecido. A decomposição do hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 e do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), responsáveis pela expansibilidade e resistência mecânica do betão, respetivamente, deram origem ao aparecimento de fissuras, sendo o efeito combinado causador de perdas significativas da capacidade mecânicas do betão. A falta de ligação matriz/fibras potenciou o aparecimento de poros no betão, que ao serem preenchidos pelo vapor de água do processo de aquecimento, aumentaram a pressão nos vazios e originou o efeito de delaminação [LIMA ET AL, 2004].

A exposição dos provetes a altas temperaturas foi bastante agressiva, tendo-se verificado alterações graves nas propriedades físicas e mecânicas do betão. A matriz cimentícia foi afetada de forma acentuada, onde as fibras de aço como elemento mais pesado prevaleceram perante a desintegração da matriz, de menor densidade, demonstrado pelo

aumento da massa volúmica real. A afetação da matriz cimentícia expressa pelo aumento acentuado dos vazios presentes no betão, afetaram as resistências mecânicas, que diminuíram cerca de 50%.

6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O trabalho desenvolvido, e que conduziu à elaboração da presente dissertação, permitiu contribuir para o conhecimento do comportamento do SIMCON-BCC, no que diz respeito à sua durabilidade e quando sujeito a condições de cura e de exposição potencialmente agressivas. No presente capítulo foi efetuada uma síntese das conclusões referentes ao desempenho do material, com base nos resultados dos ensaios realizados, e encontra-se organizada por variável em análise, entenda-se presença de lâ de aço e diferentes condições de cura e de exposição.

6.1. INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DE LÃ DE AÇO

A introdução de lâ de aço em compósitos cimentícios, tal como verificado por vários autores (Bayasi et al em 1997, Murakami et al em 1998, Coskun em 2002 e Quinino em 2015, entre outros) apresentou efeitos benéficos quando avaliadas as propriedades físicas e mecânicas do betão, associadas ao ganho de tenacidade, ao aumento das resistências mecânicas e ao controlo da quantidade e velocidade de propagação de fissuras.

A otimização da composição do SIMCON-BCC, acompanhada por uma boa mistura e compactação no ato da moldagem, aumentaram a resistência mecânica, mesmo para grandes volumes de fibras, como verificado por Lopes em 2005 e Dias em 2015.

A lâ de aço foi colocada nos moldes onde se faz infiltrar a pasta cimentícia, ficando distribuída aleatoriamente pelo betão. A disposição da lâ de aço teve um efeito positivo na distribuição dos esforços de tração, correspondendo a um ganho muito significativo de resistência à tração por flexão (ganhos na ordem dos 3000%) e, menos significativo, na resistência à compressão. A presença da lâ de fibras não influenciou sobre a volumetria dos poros, e sua distribuição, nem na rede capilar, muito devido à fluidez da calda de cimento e compactação adequada aquando da produção do SIMCON-BCC. No que toca ao módulo de elasticidade dinâmico, observou-se um decréscimo de 17%.

6.2. CURA EM CONDIÇÕES AMBIENTAIS CORRENTES

O desempenho do SIMCON-BCC endurecido foi afetado de forma considerável quando comparados os processos de cura em condições ambientais correntes com as regras especificadas na norma NP EN 12390-2:2009, reforçando a ideia que uma cura adequada, caracterizada pela hidratação constante, promove betões menos porosos e com menos perdas de resistências mecânicas, tal como descrito na literatura, através dos estudos efetuados por Coutinho em 1994, Barbosa em 2013 e Leal em 2015.

O teor de humidade relativa do ar na cura do betão é um fator condicionante, a par da temperatura, regulando a aquisição de propriedades durante o endurecimento. A humidade relativa do ar de $60\pm 10\%$ e a temperatura de $25\pm 10^{\circ}\text{C}$ registadas durante a fase de cura do SIMCON-BCC quando sujeito a condições ambientais correntes, afetaram de forma relevante o material. Verificaram-se aumentos acentuados da rede de capilares, na ordem dos 120%, e também o volume de poros foi afetado, tendo-se registado um aumento na ordem dos 40%. A resistência à compressão apresentou uma diminuição da ordem dos 17% e a resistência à tração por flexão, diminuiu cerca de 15%. A velocidade de propagação de ultrassons registou um decréscimo na ordem dos 2% com consequente diminuição do módulo de elasticidade.

6.3. CURA EM AMBIENTE MARÍTIMO SUBMERSO

O processo de cura adotado diferenciou-se do método de referência pela imersão dos provetes em água do mar, igualando-se as condições de humidade relativa e de temperatura. No entanto, a presença de sais na água marítima fez com que o betão reagisse ao nível da sua microestrutura compreendida pelo aumento acentuado da rede de capilares e a nível químico através da diminuição da capacidade resistente a esforço de tração, devido à afetação da integridade das fibras que oxidaram.

O contacto permanente do betão com os sais marítimos durante o processo de cura, tal como descrito em 4.5.3., permitiu concluir que, tal como verificado por Lima e Morelli em 2004, o desempenho da lâ de aço foi afetado através da oxidação da mesma, o que levou a uma diminuição significativa da resistência à tração por flexão (21%).

Verificaram-se aumentos acentuados na rede de capilares de 53%, apesar do volume de poros ter diminuído cerca de 6%, tal fator deveu-se à forte afetação da microestrutura em relação à macroestrutura da matriz cimentícia. Quanto às resistências mecânicas, para além da diminuição da resistência à tração, na resistência à compressão verificou-se um decréscimo de 10%. Relativamente ao módulo de elasticidade dinâmico verificou-se que este não foi afetado pelo método de cura adotado.

6.4. EXPOSIÇÃO A CICLOS DE GELO/DEGELO

Na produção da mistura, a calda de cimento apresentou fluidez adequada e efetuaram-se os procedimentos de compactação apropriados, tendo-se minimizado a presença de poros, normalmente associados às zonas de interface matriz/fibras, tal como descrito por Lima e Libório em 2008.

Os ciclos gelo/degelo, caracterizados pela variação da temperatura entre -20 e 20°C , fizeram com que a mudança de fase da água potenciase pressões expansivas no betão. À semelhança do estudo efetuado por Ferreira em 2000 e por Cunha em 2014, a mudança constante de estado físico da água e o seu movimento no interior do SIMCON-BCC originou um aumento de vazios no betão (porosidade aumentou 8%), sendo mais expressivo o aumento da rede de capilares.

A deterioração na rede de capilares, onde se verificou um aumento de 22%, decorreu da incapacidade do betão resistir às tensões geradas no acréscimo de volume da água ao congelar. Esta debilidade decorreu da dificuldade de redistribuição da água presente no interior do SIMCON-BCC, tal como descrito por Yan em 2013. O baixo grau de saturação do betão, recorrente das condições de exposição adotadas no ensaio descrito em 4.5.4. auxiliou a que o SIMCON-BCC não fosse afetado de forma significativa quanto ao desgaste físico, não se fazendo surtir quaisquer efeitos negativos nas resistências mecânicas.

6.5. EXPOSIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS

A exposição do SIMCON-BCC a temperaturas elevadas, tal como descrito em 4.5.5., desgastou a matriz cimentícia tendo-se verificado um incremento da estrutura de poros em 120%. A subida da temperatura fez com que a água presente na matriz cimentícia evaporasse criando tensões internas que esta não suportou, tal como observado por Lima et al em 2004 e Santos e Rodrigues em 2011.

Os resultados deste programa experimental são similares aos descritos na literatura, onde se verificou que a quantidade de poros aumentou de forma acentuada e que esse fator se refletiu nas resistências mecânicas, que diminuíram.

A exposição a altas temperaturas foi bastante agressiva para o SIMCON-BCC, tendo-se verificado alterações severas nas propriedades físicas do material. A matriz cimentícia foi afetada de tal forma que, a massa volúmica real aumentou significativamente, explicado pela prevalência da lã de aço, elemento com massa volúmica mais elevada, aquando da degradação da matriz cimentícia. A temperatura desgastou a matriz cimentícia que deu lugar a vazios que por sua vez afetaram as resistências mecânicas, que diminuíram cerca de 50%. Verificaram-se aumentos acentuados de porosidade, na ordem dos 120%, e também foi afetada de forma expressiva a rede capilar, tendo-se observado um aumento do coeficiente de capilaridade na ordem dos 340%.

6.6. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como trabalhos futuros que podem prosseguir o trabalho realizado no âmbito desta dissertação, sugere-se a importância de realizar os seguintes estudos:

- Estudar o desgaste físico e químico do SIMCON-BCC quando sujeito a exposição prolongada em ambiente marítimo;
- Estudar o desgaste físico e químico do SIMCON-BCC quando sujeito a ciclos de gelo/degelo mais severos;
- Otimizar a composição SIMCON-BCC para melhorar o seu desempenho quando sujeitos a altas temperaturas;
- Estudar o desgaste físico e químico do SIMCON-BCC quando sujeito a condições de altas temperaturas, mas a atingir patamares abaixo dos estudados neste trabalho;
- Estudar as zonas de interface dos SIMCON-BCC com recurso a técnicas de microscopia ótica e de microscopia eletrónica de varrimento;

- Otimizar a composição de SIMCON-BCC para dosagens de ligante mais baixas por forma a otimizar o custo/benefício do material;
- Avaliar as condições de produção e desempenho do SIMCON-BCC em condições reais de utilização.

7. BIBLIOGRAFIA

ACI Committe 544 (1997). Fiber Reinforced Concrete: ACI 544.1R-96. American Concrete Institute

ALMEIDA, N. G.; PINTO, A. P. F.; GOMES, A. (2012). *Caldas de cal hidráulica para consolidação de alvenarias antigas*. Influência da relação a/l e do tipo de cura. Departamento de Engenharia Civil, IST/UTL

ALMEIDA, S. M. (2012). *Análise do módulo de elasticidade dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante*. Programa de Pós-graduação em Construção Civil. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia de Materiais e Construção. Belo Horizonte

ARMITA - http://armita.ir/?page_id=72. 18-08-2017

BARBOSA, M. V. C. (2013). *O betão: Definição, caracterização e propriedades*. Relatório de Estágio para obtenção do grau de Mestre em Engenharia na Área de Especialização em Edificações. ISEL

BARROS, J. A. O. (1996). *Caracterização do comportamento do betão reforçado com fibras de aço por intermédio de ensaios experimentais*. Departamento Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães

BARROS, J. A. O. (2000). *Betão reforçado com fibras de aço – Conceitos fundamentais*. Dep. de Eng^a Civil da Escola de Eng^a da Universidade do Minho. Guimarães

BAYASI, Z.; ZENG, J. (1997). *Flexural Behavior of Slurry Infiltrated Mat Concrete (SIMCON)*. Journal of Materials in Civil Engineering. November 1997

BENTUR, A; MINDESS, S. (2007). *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. Faculty of Civil and Environmental EngineerinTechnion-Israel Institute of Technology, Israel. Department of Civil Engineering

BERNARDI, S.T. (2003). *Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes coménticias reforçadas com fibra de aramida kevlar*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Curso de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia. Porto Alegre

BOSCO, V. I. D. (2015). *Análise comparativa entre concreto convencional reforçado com fibras de aço e polipropileno através de ensaios com propagação de onda ultrassônica*. XXVII Salão de Iniciação Científica. UFRGS. Porto Alegre

BRANDT, A. M. (2008). *Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering*. Institute of Fundamental Technological Research, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland

BRAZ, M.C.A; NASCIMENTO, F.B.C (2015). *Concreto reforçado com fibras de aço*. Ciências exatas e tecnológicas, Novembro, p. 43-56, Maceió

CATARINO, J. F. (2012). *Avaliação da Influência do Cimento na interação Cimento-Superplastificante*. Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química, ISEL

CEN (1998) - EN 1015-6:1998. Methods of test mortar for masonry – Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar

CEN (1999) - EN 1015-3:1999. Methods of test mortar for masonry – Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)

CIMENTOITAMBE (2009). <http://www.cimentoitambe.com.br/a-cor-do-cimento-e-a-cor-do-concreto/>

CIMPOR (2014). http://www.cimpor-portugal.pt/cache/binImagens/Ficha_Tecnica_-_CEM_I_52,5R-1468.pdf. 26-06-2017

COSKUN, H. (2002). *Construction of SIMCON Retrofitted Reinforced Concrete Columns*. A dissertation submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University. Raleigh

COSTA, A. (2012). *Utilização de Geopolímeros para Proteção de Betão: Resistência a altas temperaturas*. Tese de Mestrado Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade do Minho - Escola de Engenharia

COSTA, A.; APPLETON, J. (2002). *Estruturas de Betão I: Parte II – Materiais*. Departamento de Engenharia Civil – IST, Lisboa

COUTINHO, A. S.; GONÇALVES, A. (1994). *Fabrico e propriedades do betão*. Volume III – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

CUNHA, S; AGUIAR, J; FERREIRA, V; TADEU, A. (2014). *Caracterização mecânica e durabilidade de argamassas térmicas*. Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento. Coimbra

DIAS, N. (2015). *Betão reforçado com lã de aço – BRLA Produção e Caracterização*. Dissertação de Mestrado, ESTBarreiro/IPS

DOTTO, J. M. R. (2006). *Corrosão do aço induzida por íons cloreto – uma análise crítica das técnicas eletroquímicas aplicadas ao sistema aço-concreto com ou sem pozolana*. Tese

para obtenção do título de Doutor em Engenharia, Escola de Engenharia - Universidade do Rio Grande do Sul

ENGINEERING STATISTICS (2014).
<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/prc/section1/prc16.htm>. 17-09-2017

FERREIRA, N. A. M. (2015). *Avaliação do desempenho mecânico de betão reforçado com lâ de aço*. Dissertação para obter o Grau de Mestre em Engenharia dos Materiais, IST

FERREIRA, R.M. (2000). *Avaliação de Ensaio de Durabilidade do Betão*. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil em Materiais e Reabilitação da Construção, Escola de Engenharia – Universidade do Minho

GARCIA, J.R.; OLIVEIRA, I. R.; PANDOLFELLI, V. C. (2007). *Processo de hidratação e os mecanismos de atuação dos aditivos aceleradores e retardadores de pega do cimento de aluminato de cálcio*. Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de S. Carlos

GIRSKAS, G. (2015). *Frost resistance of hardened cement paste modified with synthetic zeolite*. <https://www.researchgate.net/publication/261662931>. 18-07-2017

GOMES, A.; PINTO, A. P. F.; PINTO, J. B. (2013). *Cimento Portland e Adições*. IST

INÁCIO, M. M. G. (2014). *Betão de Elevada Resistência*. HiCon, Uso Racional de BER em Estruturas de Laje Fungiforme Sujeitas a Ações Cíclicas e Sísmicas

INZYNIERBUDOWNICTWA (2009).
http://www.inzynierbudownictwa.pl/images/magda/fibra_fot_1.jpg. 10-07-2017

IPQ (2007 a). NP EN 206-1:2007. *Betão – Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*.

IPQ (2007 b). NP EN 12504-4:2007. *Ensaio do betão nas estruturas – Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons*

IPQ (2009 a). NP EN 12390-2:2009. *Ensaio Betão Endurecido. Execução da cura dos provetes*

IPQ (2009 b). NP EN 12390-3:2009. *Ensaio do betão endurecido – Parte 5: Resistência à compressão de provetes*

IPQ (2009 c). NP EN 12390-5:2009. *Ensaio do betão endurecido – Parte 5: Resistência à flexão de provetes*

IPQ (2009 d). NP EN 12390-7:2009. *Ensaio do betão endurecido – Parte 7: Massa volumica do betão endurecido*

IPQ (2012). NP EN 197-1:2012. *Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*

ISO (2014). ISO 834-10: *Fire-resistance tests. Elements of building construction*

KULISCH, D. (2011). *Ataque por sulfatos em estruturas de concreto*. Trabalho Final de Curso em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Civil

LAU, A.; PHIL, M. (2003). *Effect of high temperatures on normal strength concrete and high performance concrete containing steel fibers*. The Hong Kong Polytechnic University

LEAL, L. (2015). *Metodologias de Avaliação do Teor de Humidade Aplicável em Obra*. Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil — Especialização em Construções, Universidade do Porto

LIMA, A. B. (2011). *O processo produtivo do cimento Portland*. Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais. Belo Horizonte

LIMA, M.G.; MORELLI, F. (2004). *Caracterização da agressividade do ambiente marinho às estruturas de concreto*. Divisão de Infra-Estrutura Aeronáutica - ITA, São José dos Campos

LIMA, R.C.A.; KIRCHHOF, L. D.; CASONATO, C.A.; SILVA FILHO, L. C. P. (2004). *Efeito de altas temperaturas no concreto*. 2º Seminário de Patologia das Edificações “Novos Materiais e Tecnologias Emergentes, Novembro 2004, Porto Alegre (RS)

LIMA, S. M.; LIBORIO, J. B. L. (2008). *Concreto de alto desempenho em ambientes com baixas temperaturas*. Cadernos de Engenharia de Estruturas, UPS

LIMA, S. M.; LIBORIO, J. B. L. (2009). *Concreto de alto desempenho aplicado a sistemas de processamento e armazenagem de alimento em baixas temperaturas*. Cadernos de Engenharia de Estruturas, UPS

LNEC (1993 a). E393-1993. *Betões. Determinação da absorção de água por capilaridade*

LNEC (1993 b). E394-1993. *Betões. Determinação da absorção de água por imersão – Ensaio à pressão atmosférica*

LNEC (2007). E464-2007. *Betões. Metodologia prescritiva para uma vida útil de projeto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais*

LOPES, M. M. (2005). *Substituição parcial de armadura de flexão por fibras de aço em vigas de concreto*. Tese para a obtenção do grau de mestre em ciências em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro

MASTER-BUILDERS-SOLUTIONS (2017). <https://www.master-builders-solutions.basf.pt/pt-pt/funcoes-e-aplicacoes/producao-de-betao/betao-reforcado-com-fibras> .

MC-BAUCHEMIE (2009). <http://www.mc-bauchemie.pt/~media/Files/MC-Bauchemie/Products/pt-PT/Technical%20Datasheet/MC-PowerFlow%202230.pdf> 15-07-2017

- MURAKAMI, H.; ZENG, J.Y. (1998). *Experimental and analytical study of SIMCON tension members*. Department of Applied Mechanics and Engineering Sciences, University of California at San Diego (USA)
- NAAMAN, A. E. (1987). *High performance fiber reinforced cement composites*. Univ. of Michigan
- NISTIR 6210 (2008). *Experimental Plan for Testing the Mechanical Properties of High-Strength Concrete at Elevated Temperatures*
- OSÓRIO, P. D. L. (2006). *Concepção de um saferoom anti-tornado em betão geopolimérico*. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil. Universidade do Minho
- PESSOA, M. B; BRITO, P.; PINHO DE ALMEIDA, F.; COELHO, M. F.; PEREIRA DA COSTA, R. (2001). *Síntese e Caracterização de um Superplastificante para Betão*
- PHAN, L. T. (2005). *High-Strength Concrete at High Temperature – An Overview*. NIST
- PINHEIRO, J. I. D.; CARVAJAL, S. S. R.; CUNHA, S. B.; GOMES, G.C. (2012). *Estatística e Probabilidade – Quantificando a Incerteza*. CAMPUS
- QUININO, U. C. M. (2015). *Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibra*. Escola de Engenharia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- RAMOS, D.M.B.S.L. (2014). *Resistência a ciclos gelo - degelo de betões fabricados com agregados finos reciclados de betão*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, IST
- RILEM (1994). *TC 117: Freeze-thaw and deicing resistance of concrete*
- RILEM (2007). *TC 200: Mechanical concrete properties at high temperature – Modeling and applications. Materials and Structures*
- SANTOS, C. C.; RODRIGUES, J. P. (2011). *O efeito das altas temperaturas nas propriedades mecânicas residuais do betão*. 2as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos Universidade de Coimbra
- SANTOS, M. F. S. (2011). *Análise da retenção da trabalhabilidade da fase argamassa dos betões auto-compactáveis*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior
- SECIL (2014). <https://secilpro.com/upload/documents/54f898eeabd15.pdf>.15-07-2017
- SETZER, M. J.; FAGERLUND, G; JANSSEN, D. J. (1996). *CDF Test – Test method for the freeze-thaw resistance of concrete – tests with sodium chloride solution(CDF)*. Materials and Structures, RILEM

SHANNAG, M. J. (2002). *High-Performance cementitious mortars for structural repair*. Department of Civil Engineering, Jordan University of Science and Technology. Jordan

SHIMADA, H. (1999). *Impacto da prospecção geológica na otimização do processo de produção de cimento Portland na fábrica de cimento Votoran, Votorantim, SP*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo – Instituto de Geociências

SILVA, B. A. (2009). *Análise da influência do tipo de cura na resistência à compressão de corpos-de-prova de concreto*. Instituto Tecnológico de Aeronáutica

SILVA, J. D. P. (2013). *Comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de fibras de carbono (CFRP)*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, IST

SILVA, P.; FERNANDES, P.; SENA-CRUZ, J.; AZENHA, M.; BARROS, J. (2014). *Efeito de ciclos térmicos e de ciclos gelo/degelo no comportamento estrutural de elementos de betão reforçados com laminados de CFRP pela técnica NSM*. 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas. ISISE / Universidade do Minho

SKRIPKIUNAS, G.; NAGROCKIENE, D.; GIRSKAS, G.; VAICIENE, M.; BARANAUSKAITE, E. (2013). *The cement type effect on freeze – thaw and deicing salt resistance of concrete*. 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, Department of Building Materials, Faculty of Civil Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania

TANESI, J.; FIGUEIREDO, A.D. (1999). *Fissuração por Retração em Concretos Reforçados com Fibras de Polipropileno (CRFP)*. Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica – USP

TEMPO.PT - <https://www.tempo.pt/barreiro.htm>. 19-07-2017

TOSTA, L. I.; SOUZA, A. C.; SILVA, R. J. (2007). *Gestão da energia na produção de cimento Portland com uso de mineralizadores e combustíveis alternativos*. XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Foz do Iguaçu, PR, Brasil

VARELA, N; VIEIRA, F. S. (2005). *Cimento: Uma matéria-prima essencial no fabrico de argamassas*. Secil, SA

VCIMENTOS (2009). <http://www.vcimentos.com.br/Responsabilidade/processoProducao.htm> . 15-07-2017

VOLTAAOCONHECIMENTO (2016). <http://www.voltaaoconhecimento.pt/single-post/2016/08/03/Bet%C3%A3o-refor%C3%A7ado-com-l%C3%A3-de-a%C3%A7o-de-baixo-valor-comercial>. 07-07-2017

WOOD, B. (2000). *Use of Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON) in Hinge Regions for Earthquake Resistant Structures*. Thesis submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State. Raleigh

YAN, T.S.A. (2013). *Técnicas e laboratórios de ensaio de betões*. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, IST